



LA BIOTECHNOLOGIE AU SERVICE DE PRODUITS ET DE PROCÉDÉS INDUSTRIELS PROPRES

Vers un
développement
industriel
durable

**LA BIOTECHNOLOGIE AU SERVICE
DE PRODUITS ET DE PROCÉDÉS
INDUSTRIELS PROPRES**

VERS UN DÉVELOPPEMENT INDUSTRIEL DURABLE

ORGANISATION DE COOPÉRATION ET DE DÉVELOPPEMENT ÉCONOMIQUES

En vertu de l'article 1^{er} de la Convention signée le 14 décembre 1960, à Paris, et entrée en vigueur le 30 septembre 1961, l'Organisation de Coopération et de Développement Économiques (OCDE) a pour objectif de promouvoir des politiques visant :

- à réaliser la plus forte expansion de l'économie et de l'emploi et une progression du niveau de vie dans les pays Membres, tout en maintenant la stabilité financière, et à contribuer ainsi au développement de l'économie mondiale;
- à contribuer à une saine expansion économique dans les pays Membres, ainsi que les pays non membres, en voie de développement économique;
- à contribuer à l'expansion du commerce mondial sur une base multilatérale et non discriminatoire conformément aux obligations internationales.

Les pays Membres originaires de l'OCDE sont : l'Allemagne, l'Autriche, la Belgique, le Canada, le Danemark, l'Espagne, les États-Unis, la France, la Grèce, l'Irlande, l'Islande, l'Italie, le Luxembourg, la Norvège, les Pays-Bas, le Portugal, le Royaume-Uni, la Suède, la Suisse et la Turquie. Les pays suivants sont ultérieurement devenus Membres par adhésion aux dates indiquées ci-après : le Japon (28 avril 1964), la Finlande (28 janvier 1969), l'Australie (7 juin 1971), la Nouvelle-Zélande (29 mai 1973), le Mexique (18 mai 1994), la République tchèque (21 décembre 1995), la Hongrie (7 mai 1996), la Pologne (22 novembre 1996) et la Corée (12 décembre 1996). La Commission des Communautés européennes participe aux travaux de l'OCDE (article 13 de la Convention de l'OCDE).

Also available in English under the title:

**BIOTECHNOLOGY FOR CLEAN INDUSTRIAL PRODUCTS AND PROCESSES
TOWARDS INDUSTRIAL SUSTAINABILITY**

© OCDE 1998

Les permissions de reproduction partielle à usage non commercial ou destinée à une formation doivent être adressées au Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC), 20, rue des Grands-Augustins, 75006 Paris, France, Tél. (33-1) 44 07 47 70, Fax (33-1) 46 34 67 19, pour tous les pays à l'exception des États-Unis. Aux États-Unis, l'autorisation doit être obtenue du Copyright Clearance Center, Service Client, (508)750-8400, 222 Rosewood Drive, Danvers, MA 01923 USA, or CCC Online: <http://www.copyright.com/>. Toute autre demande d'autorisation de reproduction ou de traduction totale ou partielle de cette publication doit être adressée aux Éditions de l'OCDE, 2, rue André-Pascal, 75775 Paris Cedex 16, France.

AVANT-PROPOS

La biotechnologie au service de produits et de procédés industriels propres : vers un développement industriel durable est le rapport d'un Sous-groupe *ad hoc* du Groupe de travail de l'OCDE sur la biotechnologie. Il a été approuvé par le Groupe de travail à sa sixième réunion les 24-25 février et par le Comité de la politique scientifique et technologique les 10-11 mars 1998. Il avance l'examen par l'OCDE des biotechnologies appliquées à l'environnement, initié par le rapport intitulé *La biotechnologie pour un environnement propre* (1994) et ayant donné lieu aux ateliers de Tokyo (1994), d'Amsterdam (1995) et du Mexique (1996), mais ouvre également la voie à de nouveaux efforts pour améliorer la viabilité écologique de l'industrie dans la zone de l'OCDE et en dehors de celle-ci.

La biotechnologie industrielle prend de l'importance dans un monde où les préoccupations de viabilité écologique ont acquis une dimension planétaire. Ce rapport illustre la manière dont les procédés biotechnologiques modernes peuvent répondre à ces préoccupations mondiales et s'introduisent dans les activités industrielles de nombreux secteurs. Il met en relief leurs avantages environnementaux et économiques par rapport à d'autres technologies, et recense les goulets d'étranglement techniques et autres. Il souligne aussi que l'industrie et les pouvoirs publics doivent agir de concert pour relever les défis de la viabilité écologique de l'industrie grâce à la biotechnologie.

Le Sous-groupe *ad hoc* était présidé par Alan Bull (Royaume-Uni) et co-présidé par Barry Marrs (États-Unis) et Ryuichiro Kurane (Japon). Cette équipe, complétée par Wulf Crueger (Allemagne), a coordonné les travaux de rédaction avec l'aide du Secrétariat, où les responsabilités en la matière incombaient à Salomon Wald et Tadashi Hirakawa.

Ce rapport a été rédigé par sept coordinateurs de chapitre : chapitre 1, A. Bull (Royaume-Uni); chapitre 2, B. Marrs (États-Unis) et H. Doddema (Pays-Bas); chapitre 3, R. Kurane (Japon); chapitre 4, W. Crueger (Allemagne); chapitre 5, B. Dixon (Royaume-Uni); chapitre 6, V. Aidun (Canada), remplaçant D. Mahon (Canada); chapitre 7, tous.

Les membres du Sous-groupe *ad hoc* ont en outre apporté des contributions essentielles, en particulier R. Atlas (États-Unis) en tant qu'expert scientifique et politique et M. Griffiths (Royaume-Uni) en tant qu'assistant du président.

Nous remercions vivement pour leur aide de nombreux autres contributeurs, dont des entreprises industrielles. Beaucoup d'entre eux sont mentionnés dans les différents chapitres du rapport.

Nous sommes particulièrement reconnaissants à la Commission européenne (DG XII) et aux gouvernements de l'Allemagne (BMBF), du Japon (MITI) et des Pays-Bas (ministère des Affaires économiques) pour leurs contributions volontaires généreuses au financement de ce rapport.

Ce rapport est publié sous la responsabilité du Secrétaire général de l'OCDE et ne reflète pas nécessairement les vues de l'OCDE et de l'ensemble de ses pays Membres. Il convient également de préciser que la mention d'entreprises industrielles, de noms de marques ou de produits commerciaux spécifiques ne constitue en aucun cas une approbation ou une recommandation de la part de l'OCDE.

TABLE DES MATIÈRES

| | |
|---|-----|
| Résumé | 7 |
| Préface | 13 |
| <i>Chapitres</i> | |
| 1. Viabilité écologique de l'industrie et rôle de la biotechnologie | 15 |
| 2. Applications industrielles actuelles de la biotechnologie | 31 |
| 3. Tendances et perspectives scientifiques et technologiques | 69 |
| 4. Évaluation de la propreté des produits et procédés biotechnologiques industriels | 95 |
| 5. Attitudes et sensibilisation du public | 129 |
| 6. Politiques nationales et internationales | 147 |
| 7. Conclusions et implications pour l'action des pouvoirs publics | 153 |
| <i>Annexes</i> | |
| 1.1. Modèles de durabilité industrielle | 157 |
| 1.2. Innovations en matière de chimie propre | 159 |
| 2.1. Développements récents de la biotechnologie répondant aux besoins de la chimie des procédés | 161 |
| 2.2. Pâtes et papiers | 162 |
| 2.3. Métaux et minéraux | 168 |
| 4.1. Méthodologie de l'ACV | 173 |
| 4.2. Normalisation des ACV | 183 |
| 4.3. Examen des analyses du cycle de vie | 185 |
| 4.4. Besoins en matière de recherche | 192 |
| 6. Politiques et législations au Canada, au Japon et en Allemagne | 198 |
| Glossaire | 217 |
| Liste des participants | 221 |

RÉSUMÉ

La biotechnologie industrielle est parvenue à maturité. L'objet du présent rapport, à savoir l'amélioration de la viabilité écologique de l'industrie à travers la biotechnologie, englobe de nombreuses préoccupations d'environnement à l'échelle planétaire. La biotechnologie, qui présente des avantages manifestes du point de vue de l'environnement, est compétitive sur le plan économique dans un nombre croissant de secteurs industriels. Pour un même niveau de production industrielle, elle permet de réduire la consommation de matières et d'énergie, ainsi que la pollution et les déchets engendrés. Un flux continu d'innovations techniques, notamment dans le domaine des technologies de l'ADN recombiné, est essentiel pour assurer une plus large utilisation de la biotechnologie dans l'industrie. En outre, les pouvoirs publics et l'industrie devront agir ensemble pour promouvoir la mise au point et l'utilisation des produits et procédés industriels propres.

La **Biotechnologie pour des produits et procédés industriels propres** continue le passage en revue des applications de la biotechnologie à la protection de l'environnement, effectué par l'OCDE. Il a débuté par *La biotechnologie pour un environnement propre* (OCDE, 1994), qui traitait de la biodépollution de l'air, du sol et de l'eau, et s'est poursuivi avec les ateliers de Tokyo en 1994, d'Amsterdam en 1995 et de Mexico en 1996 (OCDE, 1995, 1996, 1997).

Le premier chapitre, « **Viabilité écologique de l'industrie et rôle de la biotechnologie** », met en évidence le changement de paradigme qui s'est opéré depuis le début des années 90 : il ne s'agit plus de dépolluer un environnement déjà dégradé, mais de revoir la conception des technologies exploitées par les procédés industriels, en vue de s'attaquer à la pollution à la source. Cependant la notion de « technologie propre » est apparue si rapidement que les programmes élaborés au niveau théorique sont, à bien des égards, en avance sur la R-D indispensable, et ne tiennent pas non plus compte du potentiel technologique existant. Sans un apport continu d'innovations créatives s'appuyant sur une science et des technologies de pointe, parmi lesquelles la biotechnologie devrait occuper une place de plus en plus importante, il ne sera pas possible d'appliquer des « technologies propres » ou de parvenir à la « viabilité écologique de l'industrie », les deux expressions se recouvrant largement. L'écart entre les programmes théoriques, les besoins en matière de R-D et les possibilités techniques peut être réduit en attirant l'attention des pouvoirs publics, de l'industrie et de la population sur les potentialités croissantes de la biotechnologie, mais également sur les obstacles à éliminer pour que ces potentialités se réalisent.

Bien que la notion de développement durable se révèle souvent difficile à cerner, il est clair qu'un progrès en direction de la viabilité écologique de l'industrie (diminution de la consommation relative d'énergie et de matières premières, réduction ou élimination des déchets) affectera tous les stades du cycle de vie d'un produit ou d'un procédé. Il devra faire appel à de nouveaux principes de conception découlant d'une approche planétaire et globale de la réduction des impacts sur l'environnement : planétaire parce que ces impacts traversent les frontières nationales, et globale parce que les solutions à court terme et au coup par coup pour traiter une succession de questions prises isolément sera de moins en moins efficace. L'analyse du cycle de vie (ACV) (quatrième chapitre) offre un moyen remarquable d'intégrer les préoccupations d'environnement dans les opérations et la conception industrielles. C'est aussi la meilleure méthode, puisque fondée sur une approche globale, pour mesurer la propreté. Il faut toujours définir les « extrémités » de l'ACV, c'est-à-dire les limites entre lesquelles elle s'applique dans un procédé en plusieurs étapes.

Les technologies propres sont portées par trois grands facteurs : la compétitivité économique, qui entre en jeu lorsque les entreprises envisagent les avantages des produits et procédés propres sous l'angle des débouchés ou des économies de coût; les politiques des pouvoirs publics, qui encouragent ou imposent des changements dans les pratiques de fabrication; et la pression exercée par le public, qui prend une dimension stratégique au moment où les entreprises cherchent à acquérir une légitimité écologique.

Il convient de chercher à savoir pourquoi les technologies propres n'ont pas été plus largement adoptées. La production maîtrisée et rapide de catalyseurs biologiques, notamment des organismes vivants ou certains de leurs éléments constitutifs exerçant une action catalytique, constitue l'un des principaux apports potentiels de la biotechnologie. Ces catalyseurs permettent d'obtenir des produits et procédés plus propres parce qu'ils sont plus spécifiques (moins de sous-produits) et plus sélectifs (il n'est plus nécessaire de purifier autant le produit de départ) que leurs concurrents non biologiques; de surcroît, ils assurent leur propre propagation. Il serait toutefois simpliste d'affirmer que la biotechnologie est intrinsèquement moins polluante; la biotechnologie n'est pas propre en elle-même, pas plus que la technologie chimique n'est polluante en elle-même. Les exemples de procédés chimiques propres sont de plus en plus nombreux et plusieurs firmes chimiques sont parvenues à réduire leurs coûts par la minimisation de leurs déchets.

Il est vraisemblable que les procédés industriels recourant à la biotechnologie se répandront à la fois parce qu'ils peuvent offrir des avantages nets sur les plans économique et environnemental et parce que leur champ d'application ne cesse de s'étendre. Si on leur prête une plus grande propreté, c'est parce qu'on a constaté que les systèmes vivants avaient tendance à accomplir leurs processus chimiques de façon plus efficace que les systèmes chimiques artificiels et à produire des déchets recyclables et biodégradables. Ce paramètre, combiné à notre aptitude grandissante à manipuler les matériaux et processus biologiques, laisse présager que la biotechnologie aura fort probablement un impact sensible sur l'avenir des industries manufacturières.

Le deuxième chapitre, «**Applications industrielles actuelles de la biotechnologie**», étaye une partie de ces observations. Ce chapitre, qui fait le point de la situation actuelle dans l'industrie, offre une vue d'ensemble de la manière dont les procédés biotechnologiques modernes pénètrent dans les opérations industrielles. Il décrit des procédés qui en sont au moins au stade de l'essai pilote en usine et propose une évaluation du poids économique des applications biotechnologiques dans divers secteurs industriels. Les six secteurs étudiés sont responsables d'une part substantielle de la pollution industrielle dans les pays de l'OCDE : produits chimiques, pâtes et papiers, textiles et cuir, transformation des aliments destinés à l'homme et aux animaux, métaux et minéraux, et énergie.

La biotechnologie recouvre un large éventail de techniques dont aucune ne s'appliquera jamais à la totalité des secteurs industriels. Néanmoins cette technologie se prête à tant d'applications que de nombreuses industries qui n'avaient pas fait appel à la biologie jusqu'à présent envisagent à l'heure actuelle de franchir ce pas. La compétitivité économique de diverses applications biotechnologiques contribuant à la propreté des procédés industriels a déjà été établie. Ce point est essentiel, car les avantages pour l'environnement motivent rarement à eux seuls l'adoption de procédés biotechnologiques. Ces procédés ont été intégrés avec succès dans certaines opérations à grande échelle. Cependant, l'application industrielle se heurte encore à plusieurs difficultés, en particulier à l'infrastructure en place dans les entreprises qui n'ont eu recours, tout au long de leur histoire, qu'aux technologies physiques et chimiques et dont les ingénieurs ne sont pas formés aux sciences ou technologies biologiques. De même, lorsque l'avantage économique des procédés biotechnologiques sur les méthodes existantes n'est pas énorme, par exemple dans le secteur chimique, la vitesse de pénétration de la biotechnologie est généralement lente.

Le sous-chapitre consacré aux substances chimiques passe en revue les produits chimiques de base, les produits de chimie fine, les enzymes, les produits pharmaceutiques et les produits phytosanitaires. La fabrication des produits chimiques engendre beaucoup de matières, consomme une grande quantité d'énergie et de ressources non renouvelables et contribue largement à la production de déchets et à la pollution. La pénétration de la biotechnologie sur le marché est variable dans ces sous-secteurs. C'est dans l'industrie de la chimie fine que l'impact de la biotechnologie propre est le plus visible.

Si les composés carbonés des combustibles fossiles (pétrole, charbon) fournissent la matière première la plus importante pour la production d'énergie et de substances chimiques, les émissions de CO₂ qui s'ensuivent sont de plus en plus préoccupantes en raison de leur puissant effet de serre. La biotechnologie peut contribuer à diminuer la consommation de composés carbonés fossiles et par conséquent le réchauffement de la planète par divers moyens : en améliorant les procédés industriels et le rendement énergétique, et en produisant des matériaux issus de la biomasse et des combustibles non polluants.

La pénétration sur le marché de la biotechnologie appliquée à la production propre est particulièrement élevée dans le secteur des pâtes et papiers en Europe, tandis que la biotechnologie se développe dans la fabrication des textiles et du cuir à travers l'ensemble de la zone OCDE. En ce qui concerne la transformation des aliments destinés à l'homme et aux animaux, c'est aux États-Unis que l'impact de la biotechnologie sur les procédés industriels propres semble le plus prononcé. La biotechnologie employée dans les industries extractives et la récupération des métaux repose sur deux technologies principales : la biolixiviation/bio-oxydation des minéraux, dont la propreté et le rendement économique supérieurs ont été signalés dans certains cas, et la biodépollution des sites contaminés par des métaux ainsi que la récupération de ceux-ci.

Dans le secteur de l'énergie, la biotechnologie a eu des retombées importantes du point de vue de l'économie et de l'impact sur l'environnement. Elle a amélioré l'efficacité globale des procédés, notamment dans le domaine de la lutte contre la pollution. Des technologies en cours de développement telles que le biogazole, le bio-éthanol et la biodésulfuration, visent à remplacer des systèmes énergivores et polluants par des systèmes plus respectueux de l'environnement. Les méthodes faisant appel à l'ADN recombiné auront une incidence majeure sur ces technologies, mais l'application à grande échelle de l'ADN recombiné ne fait que commencer et n'a pas encore eu d'effet retentissant.

Bien que séduisantes, les possibilités de réduction de la consommation de matières premières et d'énergie qu'offre la biotechnologie devraient être encouragées davantage, notamment par les pouvoirs publics, en particulier lorsque les avantages économiques sont faibles aux premiers stades de l'adoption.

Après la description du degré de pénétration actuel de la biotechnologie propre, le troisième chapitre, « **Tendances et perspectives scientifiques et technologiques** », jette un regard sur l'avenir en vue de dégager les principaux obstacles, besoins et opportunités.

La première tâche consiste à mettre en évidence « les entraves et les besoins non satisfaits du marché » ainsi que leurs implications pour la R-D future. L'application des biotechnologies propres à plus grande échelle passe par la résolution de certaines difficultés techniques, mais des progrès scientifiques et des solutions sont envisageables dans les six secteurs industriels. Dans un climat généralement dominé par la biologie moléculaire, il ne faudrait surtout pas négliger l'ingénierie des procédés biologiques et la R-D connexe : en effet, les avancées du génie biochimique conditionnent en grande partie le succès ultérieur de la biotechnologie.

On assiste en même temps à l'ouverture de vastes créneaux nouveaux : de nombreux produits et procédés actuels sont considérés comme préjudiciables à l'environnement, et des substances nouvelles à même de réduire au minimum les risques pour l'environnement et la santé retiennent l'attention. Aussi favorise-t-on les stratégies destinées à introduire des « principes de conception écologique » (« conception favorable à l'environnement ») dans les procédés de production.

Les procédés de biocatalyse innovants ou améliorés offrent les perspectives les plus intéressantes (voir le premier chapitre). Comme moins d'un pour cent des micro-organismes naturels ont été mis en culture, la recherche se tourne vers l'étude de la biodiversité inexplorée des micro-organismes, qui offre vraisemblablement des perspectives très riches pour la biocatalyse. Néanmoins, la prospection de nouveaux composés ayant une activité biologique, de biocatalyseurs et de biomatériaux dans la nature ne forme qu'une partie de cette tendance. Des protéines et des enzymes dotées de propriétés et fonctions nouvelles peuvent aussi être obtenues en améliorant des protéines ou des enzymes naturelles déjà connues; cette dernière démarche se prête peut-être même mieux à l'acquisition de propriétés ayant peu de chances d'être apparues au cours de l'évolution naturelle. L'élan actuel vers la

recherche d'extrémophiles (micro-organismes vivant dans des conditions extrêmes de température, de salinité, d'acidité, etc.) s'inspire de l'hypothèse que leurs enzymes posséderont des capacités catalytiques améliorées dans les conditions industrielles. Un autre progrès connexe, « l'évolution dirigée » des enzymes, est une méthode pratique pour créer des enzymes adaptées à toute une série d'applications.

Si on examine les principaux domaines de pointe dans les sciences de la vie en général, quatre d'entre eux apparaissent revêtir une importance stratégique particulière du point de vue des produits et procédés propres : les cultures mixtes de micro-organismes et la technologie de l'ADN recombiné (qui sont deux méthodes pour combiner des potentialités génétiques), l'ingénierie des voies métaboliques et la bioinformatique. Les avantages de l'utilisation de cultures mixtes (plusieurs souches de micro-organismes opérant ensemble) dans l'industrie sont connus, mais les progrès ont été difficiles. Le regain d'intérêt pour les cultures mixtes survient parallèlement à des découvertes significatives, par exemple le fait que les bactéries, à l'instar des fourmis, se comportent comme des organismes sociaux en émettant des signaux susceptibles d'être étudiés. La technologie de l'ADN recombiné offre un moyen encore plus puissant pour combiner diverses capacités génétiques, et permettre ainsi la conception d'organismes dotés de nouvelles activités catalytiques spécifiques. De nombreuses applications de la biotechnologie pour des produits et procédés moins polluants seront basées sur des micro-organismes recombinés. La plupart des procédés seront confinés et par conséquent soumis aux lignes directrices existantes pour les applications industrielles de l'ADN recombiné (par exemple les bonnes pratiques de production industrielle à grande échelle).

L'ingénierie des voies métaboliques, c'est-à-dire l'assemblage au sein d'un seul organisme d'une séquence métabolique dont les différentes étapes proviennent d'au moins deux organismes, est une nouvelle stratégie qui suscite désormais un intérêt considérable. Enfin, il convient de mentionner le champ interdisciplinaire de la bioinformatique. Elle acquiert un tel poids que la recherche biologique elle-même est probablement en train de passer de l'observation et de l'expérimentation traditionnelles à « l'extraction de données », grâce à laquelle les expériences innovantes seront menées « *in silico* », plutôt qu'*in vivo* ou *in vitro*.

L'industrie, les pouvoirs publics et la population sont les principales parties prenantes au développement de produits et procédés respectueux de l'environnement. Les projets de démonstration joueront un rôle essentiel en comblant l'écart entre la recherche menée en laboratoire et son application industrielle; cela déterminera le rôle spécifique des pouvoirs publics dans la recherche de technologies pour des produits et procédés plus propres.

Le quatrième chapitre, « **Évaluation de la propreté des produits et procédés biotechnologiques industriels** », aborde une question incontournable. Tout le monde admet que les produits et procédés devraient être propres, mais qu'entend-on par propre et comment mesure-t-on la propreté? À côté des avantages économiques des procédés biotechnologiques, leur propreté est déduite jusqu'à présent de résultats expérimentaux limités et de connaissances scientifiques générales. Il serait souhaitable d'obtenir une preuve plus solide de leur propreté.

Il existe plusieurs outils pour évaluer l'incidence de produits et procédés techniques sur l'environnement. L'analyse du cycle de vie (ACV) évalue les impacts potentiels sur l'environnement de produits ou de services sur la totalité de leur cycle de vie (« du berceau à la tombe »), selon une approche planétaire et globale, indépendante du lieu et du moment où un produit est fabriqué, utilisé ou éliminé.

Cette méthode est à l'heure actuelle la plus appréciée pour estimer la propreté de procédés industriels. Elle s'applique particulièrement à la détermination de la mesure dans laquelle la biotechnologie peut augmenter la propreté. L'ACV ne porte que sur les bilans matériel et énergétique d'une activité; les critères socio-politiques et économiques, qui sont également importants pour les décideurs, n'entrent pas en ligne de compte.

L'ACV se déroule en quatre étapes : la définition des objectifs et de la portée, l'analyse de l'inventaire (recensement des intrants et des extrants pertinents), l'évaluation de l'impact (comprenant la « pondération », qui représente l'aspect le plus controversé de l'ACV parce qu'elle implique de juger

l'importance relative de différents facteurs, par exemple l'émission de CO₂ par rapport à la pollution du sol par le mercure), et l'interprétation. Ce cadre méthodologique remporte une large adhésion, bien que la collecte des données risque d'être laborieuse.

L'ACV est apparue pour la première fois il y a plus de 20 ans, mais a été peu utilisée jusqu'à une date récente pour les procédés et produits biologiques, en partie parce que la biotechnologie est une science relativement nouvelle et en partie parce qu'elle soulève des difficultés méthodologiques particulières. En outre, de nombreuses ACV conduites en milieu industriel demeurent confidentielles. Néanmoins, six exemples d'ACV comparant des procédés biotechnologiques et d'autres procédés dans différentes industries seront exposés ici. Dans tous les cas, l'ACV confirme la supériorité des procédés biotechnologiques du point de vue de la propreté et de l'économie. Toutefois l'échantillon est trop petit pour autoriser des généralisations. Il faudra approfondir la recherche méthodologique pour améliorer l'ACV en général et son application à la biotechnologie en particulier.

Le cinquième chapitre, « **Attitudes et sensibilisation du public** » traite un thème dont le caractère décisif pour l'adoption finale de la biotechnologie industrielle a déjà été signalé. On peut considérer que les systèmes biotechnologiques opèrent en harmonie et non en conflit avec la nature, et la notion de technologie propre faisant appel à des processus biologiques pourrait par conséquent gagner l'adhésion du public.

Il existe peu d'informations quantitatives précises sur la perception par le public de la biotechnologie appliquée aux procédés industriels moins polluants. La sensibilisation et l'attitude du public vis-à-vis de la biotechnologie en général (ou d'instruments et d'applications spécifiques) varient beaucoup d'un pays à l'autre et évoluent au cours du temps. Certains sondages (par exemple l'Eurobaromètre) peuvent être interprétés comme encourageants pour la biotechnologie, mais on s'égèrerait en tirant des conclusions trop optimistes ou trop générales.

Sur les six secteurs industriels étudiés (deuxième chapitre), le secteur alimentaire pourrait se trouver confronté au problème de l'acceptation par le public des aliments transformés à l'aide de biotechnologies propres faisant appel à l'ADN recombiné. L'information du consommateur (par exemple l'étiquetage des aliments) est une question importante qui préoccupe le public et reste à résoudre.

Il sera nécessaire de prendre des mesures dynamiques pour promouvoir une meilleure compréhension de la biotechnologie en tant que fondement de la production propre et accélérer l'évolution de l'image de la biotechnologie auprès du public.

Il n'existe pas de stratégie unique, adaptée à toutes les situations, pour favoriser la compréhension d'un sujet aussi complexe que la biotechnologie, mais certains messages simples et cependant généraux pourraient être diffusés, notamment le fait que les micro-organismes remplissent de nombreuses fonctions utiles dans la nature, bien que le public dans sa très grande majorité les considère encore comme des agents de maladies. Les groupes cibles dans la population comprennent les relais d'opinion et les rédacteurs, notamment ceux des médias (presse, radio, télévision), les élèves et leurs professeurs à tous les niveaux d'enseignement, les étudiants en science et en ingénierie, le personnel industriel non technique, et les hommes politiques aux échelons local, national et supranational. On a constaté que le milieu scolaire était très réceptif et qu'il serait possible, en s'adressant à ce dernier, de faire progresser la compréhension de la viabilité écologique, des procédés non polluants, de la biotechnologie, etc.

En ce qui concerne l'enseignement supérieur, l'objectif qui s'impose en premier consiste à élargir la formation des biotechnologistes et des ingénieurs et d'inclure l'ACV, la viabilité écologique et d'autres notions pertinentes dans les programmes et, par suite, dans les points de vue. Un changement analogue de perspective s'impose dans la formation du personnel industriel non scientifique (recyclage). Enfin, il est indispensable d'étoffer le bagage scientifique des autorités chargées de la réglementation et de leurs électeurs au sujet de la biotechnologie pour des produits et procédés industriels propres.

Les « **Politiques nationales et internationales** » sont débattues au sixième chapitre. Bien qu'on leur reconnaisse un rôle moteur de premier plan (souvent le principal), il a seulement été possible de réaliser un bref tour d'horizon à partir des données recueillies dans les trois pays étudiés (le Canada,

l'Allemagne, le Japon). L'une des caractéristiques les plus visibles des mesures destinées à promouvoir les technologies plus propres est le fait qu'elles découlent d'engagements internationaux (par exemple la Déclaration de Rio sur l'environnement et le développement de 1992), ce qui explique certaines ressemblances nationales. Cependant, les politiques nationales dans ce domaine ne s'inspirent pas toutes de dispositions internationales.

Le nombre d'initiatives politiques et juridiques qui cherchent à encourager les technologies moins polluantes, et visent implicitement la biotechnologie propre, est élevé et ne cesse d'augmenter. Certaines ont entraîné la création de nouveaux produits, accru l'efficacité industrielle et généré de nouveaux emplois; d'autres ont été jugées trop inhibitrices. Comme le contexte réglementaire s'appliquant aux produits et procédés industriels plus propres est susceptible d'avoir des effets à la fois positifs et négatifs, il faut tenir compte des deux. Il semble toutefois qu'aucune législation nationale ou internationale ne mentionne explicitement la biotechnologie comme moyen préféré pour obtenir des produits et procédés plus propres, même si certains pays la considèrent comme une «technologie habilitante» essentielle.

Les mesures visant le grand public et destinées à modifier les préférences et les habitudes des consommateurs, auront, à long terme, la plus grande portée.

Le dernier chapitre, « **Conclusions et implications pour l'action des pouvoirs publics** », résume les enseignements majeurs du rapport et tire des conclusions pour l'action des principales «parties prenantes», notamment les pouvoirs publics et l'industrie qui doivent agir ensemble afin de faciliter la pénétration de la biotechnologie en tant que technologie habilitante. La stratégie de R-D jouera un rôle déterminant, notamment pour jeter un pont entre la recherche fondamentale et l'application finale. A cette fin, les pouvoirs publics et l'industrie pourront appuyer conjointement des projets de démonstration qui illustrent l'applicabilité de la biotechnologie.

Les dix points ci-après véhiculent les principaux messages du dernier chapitre :

- **Les préoccupations d'environnement de portée mondiale susciteront un intérêt croissant pour les produits et procédés industriels propres.**
- **La biotechnologie est une technologie habilitante qui peut contribuer puissamment à la propreté des produits et procédés industriels et offrir ainsi une base à la viabilité écologique de l'industrie.**
- **Évaluer la propreté d'un produit ou procédé industriel constitue une opération essentielle, mais complexe; l'analyse du cycle de vie (ACV) est le meilleur outil dont on dispose à l'heure actuelle pour effectuer cette détermination.**
- **Les principaux déterminants de l'adoption de procédés biotechnologiques industriels sont l'économie (forces du marché), la politique des pouvoirs publics, ainsi que la science et la technologie.**
- **En vue d'élargir la pénétration de la biotechnologie appliquée à des fins de préservation de l'environnement, les pouvoirs publics et l'industrie devront déployer un effort conjoint de R-D.**
- **Pour exploiter à fond les potentialités de la biotechnologie en tant que source de produits et procédés industriels propres, au-delà de ses applications actuelles, il faudra approfondir les travaux de R-D.**
- **Le rôle croissant de la biotechnologie, y compris l'ADN recombiné et ses applications, dans la création de produits à valeur ajoutée et dans le développement des biocatalyseurs appelle impérativement l'adoption de réglementations et de lignes directrices harmonisées et souples.**
- **Les forces du marché peuvent fournir des incitations très puissantes à la réalisation des objectifs de préservation de l'environnement.**
- **Il se peut que les mesures adoptées par les pouvoirs publics en vue de promouvoir la propreté des produits et procédés industriels aient l'incidence la plus décisive sur la mise au point et l'utilisation industrielle des procédés biotechnologiques propres.**
- **Une action de communication et de sensibilisation sera nécessaire pour que la biotechnologie contribuant à la propreté des produits et procédés gagne du terrain dans divers secteurs industriels.**

PRÉFACE

Le présent rapport examine la biotechnologie en tant que moyen d'obtenir des produits et procédés industriels moins polluants ou non polluants. Il compare les procédés biotechnologiques avec des méthodes concurrentes pour atteindre les mêmes objectifs.

Technologie non polluante

Toutes les étapes du cycle de vie d'un produit ou d'un procédé risquent de porter atteinte à l'environnement en épuisant des ressources matérielles ou énergétiques limitées ou en générant des déchets. Tout changement ou substitution qui réduit la consommation de matières et d'énergie ainsi que la production de déchets (grâce au recyclage des matières ou de l'énergie, par exemple) peut être considéré comme plus respectueux de l'environnement ou «propre». L'adoption d'une technologie propre revient aussi à réduire les risques. L'analyse du cycle de vie offre un moyen de comparer la propreté relative d'un produit ou d'un procédé.

Le premier chapitre étudie le rôle potentiel de la biotechnologie dans les procédés industriels propres et définit le cadre pour l'examen des procédés propres dans le contexte de la viabilité écologique de l'industrie. Le deuxième chapitre examine *i)* les principaux secteurs industriels dans lesquels les méthodes biotechnologiques paraissent appropriées et opportunes; *ii)* le degré de pénétration actuel, au niveau théorique et pratique, de la biotechnologie dans les secteurs industriels qui ont un impact marqué sur l'environnement; *iii)* la compétitivité économique de la biotechnologie pour les produits et procédés propres dans ces secteurs. Il fournit des exemples d'applications industrielles de la biotechnologie, classés par secteur, et évalue leur impact économique. Le troisième chapitre passe en revue les innovations scientifiques et technologiques dans tout l'éventail des biotechnologies, leurs possibilités d'adoption et les priorités en matière de R-D. Il présente les facteurs du progrès technologique et les travaux de R-D à approfondir pour introduire la biotechnologie contribuant à la propreté des produits et procédés. Le quatrième chapitre décrit les notions liées au cycle de vie ainsi que les instruments disponibles ou à développer en vue d'estimer quantitativement ce qui confère un caractère «propre» ou «plus propre» aux technologies ou aux produits et procédés nouveaux ou de remplacement dont on cherche à évaluer les qualités. L'analyse du cycle de vie offre une méthode systématique pour classer par ordre de priorité les initiatives de R-D visant des pratiques industrielles non polluantes. Les auteurs des cinquième et sixième chapitres se sont penchés sur le rôle joué par le grand public et les autorités dans la mise en œuvre de technologies industrielles propres. Ils examinent les cadres législatifs et politiques, la perception de la biotechnologie par le public et les besoins en matière d'échange d'informations, de sensibilisation et de formation. Le septième chapitre livre des conclusions et des recommandations à propos des stratégies de l'industrie et des pouvoirs publics qui sont susceptibles d'affecter la manière dont la biotechnologie est utilisée par l'industrie pour contribuer à la propreté et à la viabilité écologique.

VIABILITÉ ÉCOLOGIQUE DE L'INDUSTRIE ET RÔLE DE LA BIOTECHNOLOGIE*

- **La viabilité écologique de l'industrie implique une vision planétaire et des stratégies coordonnées.**
- **Dans un contexte industriel, la viabilité écologique suppose des produits et procédés industriels propres.**
- **La biotechnologie est compétitive avec des méthodes chimiques pour obtenir des technologies propres, et dans bien des cas les complète.**
- **Il est essentiel de déterminer ce qui est propre ou plus propre, en recourant à l'analyse du cycle de vie ou à des méthodes apparentées.**
- **La biotechnologie est une technologie habilitante polyvalente qui peut contribuer puissamment à l'obtention de produits et procédés industriels propres; elle est appelée à jouer un rôle de plus en plus grand.**

INTRODUCTION

Le premier rapport de l'OCDE sur la biotechnologie (Bull *et al.*, 1982) reléguait les préoccupations d'environnement à l'arrière-plan. A cette époque, l'accent placé sur la gestion des déchets témoignait de l'acceptation implicite d'une économie génératrice de déchets, et les options biotechnologiques étaient envisagées soit au niveau du traitement des déchets, soit, dans une bien moindre mesure, en tant que produit de départ. Durant les années qui ont suivi, les procédés biotechnologiques utilisés en bout de chaîne, au stade de l'élimination des déchets ou comme moyen de dépollution ont marqué de nombreux progrès qui ont donné lieu à toute une série d'applications commerciales (OCDE 1994; OCDE 1995a; 1996; 1997). C'est également au cours de ces années-là que les technologies visant à minimiser les déchets ou à prévenir leur formation sont apparues progressivement. Le recyclage des matériaux, la réduction au minimum de la consommation d'énergie, la conversion de procédés industriels existants en systèmes moins polluants et des applications scientifiques innovantes ont ouvert la

Encadré 1.1. Biotechnologie

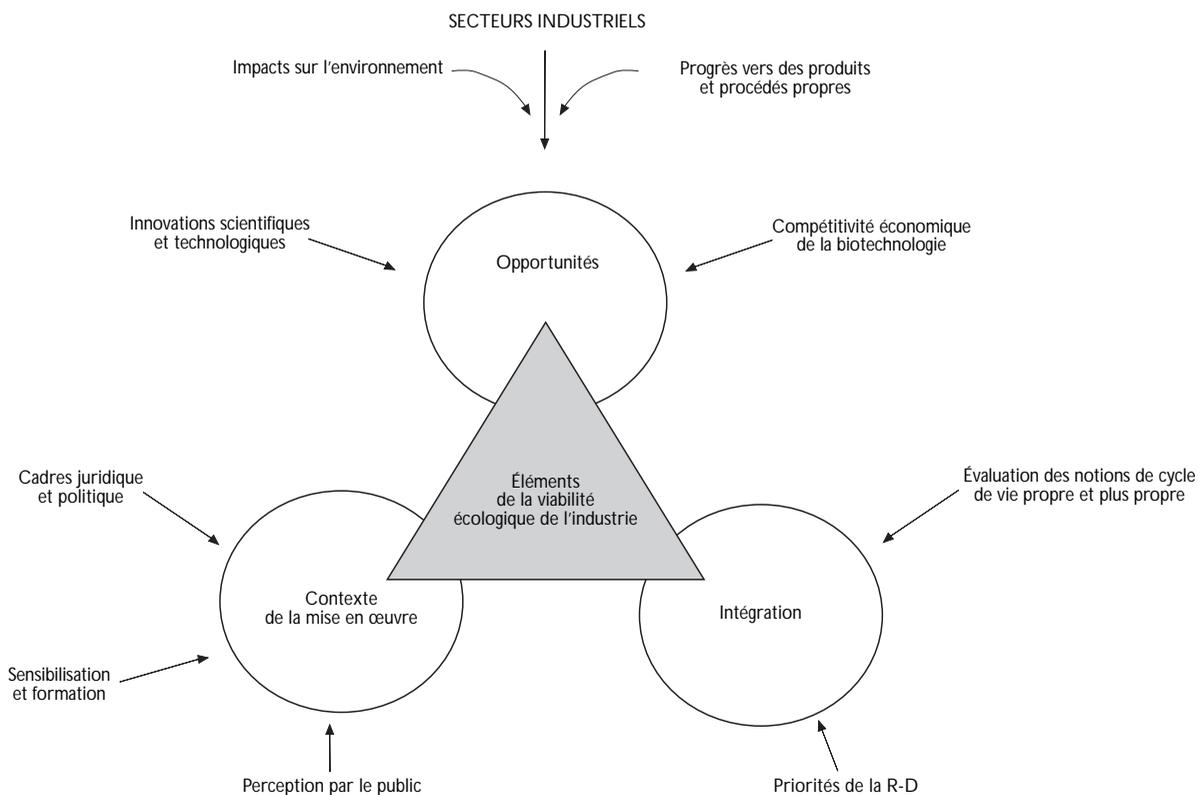
La définition de la biotechnologie utilisée dans le présent rapport se réfère à «l'application d'organismes, systèmes et processus biologiques à la production de biens et de services». Prendre comme période charnière la fin des années 50 et le début des années 60, époque marquée par la découverte de la structure et de la fonction des acides nucléiques, nous permet de faire une distinction entre la biotechnologie traditionnelle d'avant, qui intervient dans la fabrication du pain et du vin, par exemple, et la biotechnologie de la deuxième génération qui recourt, notamment, à l'ADN recombiné. Il y a toutefois lieu d'insister sur le fait que la biotechnologie va au-delà du génie génétique et fait largement appel à la technologie des procédés, à la chimie et à l'ingénierie classique.

* Le présent chapitre a été rédigé sous la responsabilité du Dr Alan Bull, Université de Kent (Royaume-Uni).

voie à la technologie propre ou plus propre. C'est pourquoi le présent rapport, qui promeut les méthodes biotechnologiques pour obtenir des produits et procédés industriels propres, représente une approche logique du développement durable.

Le présent rapport s'accorde avec la refonte du programme de travail général de l'OCDE, qui donne une grande priorité à la viabilité écologique. L'ouvrage intitulé *Le développement durable : Stratégies de l'OCDE pour le XXI^e siècle*, publié en 1997, témoigne de la diversité des travaux de l'OCDE dans ce domaine, et aussi, pour reprendre les termes du Secrétaire général de l'OCDE, de «la prise de conscience progressive (par l'Organisation) que la croissance économique ne peut plus raisonnablement se poursuivre sans que l'on se soucie bien davantage de sa durabilité». Le développement durable passe nécessairement par un flux continu d'innovations créatrices exploitant les sciences et les technologies de pointe, parmi lesquelles la biotechnologie pourrait bien jouer un rôle croissant. Le rapport est axé sur les aspects scientifiques et technologiques et sur la contribution potentielle de la biotechnologie aux produits et procédés industriels propres (figure 1.1).

◆ Figure 1.1. *Analyse des contributions actuelles et potentielles de la biotechnologie à la viabilité écologique de l'industrie*



Source : Auteur.

La technologie propre représente un nouveau paradigme, ou tout au moins un pas dans cette direction. Cette notion est apparue si rapidement que les programmes élaborés au niveau théorique sont, à bien des égards, en avance sur la R-D indispensable. L'un des principaux objectifs du présent

rapport consiste donc à indiquer les obstacles techniques et les progrès scientifiques qui ont une incidence sur l'ampleur et le rythme de l'intégration de la biotechnologie dans les produits et procédés plus propres. L'encadré 1.2 présente une sélection d'inventions et de découvertes très récentes qui sont susceptibles d'exploitation à court ou à long terme, et qui devraient à chaque fois faire progresser la technologie propre et la viabilité écologique de l'industrie.

Encadré 1.2. **Potentialités de la biotechnologie : quelques exemples récents**

Arbres fournissant le bois à pâte

- La demande mondiale de fibres de cellulose est énorme, elle se chiffre à 64 millions de tonnes aux seuls États-Unis.
- L'élimination de la lignine du bois, au cours de l'élaboration de la pâte, est un processus qui consomme une grande quantité d'énergie et de produits chimiques, et qui n'est pas viable du point de vue de l'environnement parce qu'il entraîne la formation de quantités énormes d'effluents.
- La mise en pâte du bois de conifères demande un traitement plus intensif que celle du bois de feuillus, mais la qualité de ses fibres de cellulose est supérieure.
- La modification des gènes qui commandent la formation de la lignine permet maintenant d'envisager une réduction de la teneur en lignine et une modification de la chimie de la lignine chez les conifères, qui rendraient la mise en pâte moins polluante.

Enzymes stabilisées

- Les biocatalyseurs industriels doivent toujours posséder une stabilité fonctionnelle.
- La mise au point de cristaux enzymatiques réticulés constitue un moyen d'obtenir cette stabilité.
- Les cristaux enzymatiques réticulés possèdent des structures en réseau analogues à celles des zéolithes, qui confèrent une stabilité au site catalytique dans une gamme étendue de conditions réactionnelles.

Signaux biochimiques

- Les plantes, y compris les espèces cultivées à grande échelle telles que le maïs et le coton, émettent des substances messagères volatiles lorsqu'elles sont attaquées par des insectes.
- Ces substances attirent des insectes parasites.
- Lorsque la chenille de la noctuelle de la betterave ravage le maïs, ce dernier dégage un mélange de substances qui attirent une guêpe parasite.
- La guêpe pond ses œufs dans la chenille qui finit par être digérée par les larves de la guêpe au moment de leur éclosion.
- L'étude biochimique de ces relations plante-insecte pourrait faire avancer la lutte biologique contre les ennemis des cultures.

Source : Podila et Karnosky, 1996; Anon., 1997.

Eu égard à la nécessité d'instaurer la viabilité écologique de l'industrie et de recourir à des technologies non polluantes, le présent rapport vise avant tout à :

- attirer l'attention des responsables des décisions au sein des pouvoirs publics sur les potentialités énormes de ces nouvelles technologies;
- faire connaître aux industriels les nouvelles opportunités technologiques compatibles avec des activités de transformation non polluantes;

- encourager une meilleure compréhension par le public du nombre croissant d'options technologiques à faible risque ;
- fournir des informations et des orientations techniques sur l'état actuel des connaissances, à titre d'aide à l'élaboration des politiques ;
- indiquer des voies de recherche pour la R-D qui favorisent la pénétration de la biotechnologie et la mise en œuvre de pratiques industrielles moins polluantes.

Le présent rapport fait ressortir la nécessité d'intégrer science, économie, législation et sensibilisation pour que les principes et la pratique de la viabilité écologique se répandent avec succès dans les activités industrielles à tous les niveaux. L'attitude des petites et moyennes entreprises industrielles est importante à cet égard. Aux États-Unis et en Europe, plus de 99 pour cent des entreprises tombent dans cette catégorie (moins de 500 employés) et en Europe, 93 pour cent d'entre elles sont des micro-entreprises (moins de 10 employés) (Geiser et Crul, 1996). Le présent rapport est destiné à développer dans une certaine mesure la connaissance de la biotechnologie et de la science des problèmes d'environnement, tant dans les entreprises qu'auprès du public.

VIABILITÉ ÉCOLOGIQUE : DÉFINITION ET OBJECTIFS

Encadré 1.3. Viabilité écologique

Les notions de viabilité écologique et de développement durable sont souvent difficiles à cerner. Le présent rapport s'aligne sur la Commission mondiale sur l'environnement et le développement (Brundtland, 1987) :

« Le développement soutenable est un développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures de répondre aux leurs ».

Les activités humaines (industrie, urbanisation, agriculture, pêche, foresterie et extraction minière) ont des retombées profondes sur l'environnement mondial et le maintien de la qualité de l'environnement. On admet de plus en plus qu'il faut améliorer la gestion des ressources aux échelons national, régional et mondial et réduire le volume de déchets et la pollution engendrés. En effet, tous les signataires de la Déclaration de Rio sur l'environnement et le développement (voir encadré 6.1 au sixième chapitre) sont invités à réduire et, si possible, à abandonner les modes de production et de consommation qui ne sont pas tenables du point de vue de l'environnement. La notion de viabilité écologique du rapport Brundtland, telle que développée par Hall et Roome (1996), se fonde en plus sur les hypothèses suivantes :

- le développement durable fournit un cadre à l'intégration des politiques d'environnement et des stratégies de développement ;
- le développement durable exercera une influence croissante sur l'orientation future des changements technologiques, socio-économiques, politiques et culturels planétaires et définira les limites de ce qui est possible et de ce qui est souhaitable ;
- si les voies menant au développement durable sont vraisemblablement multiples, la viabilité écologique devrait être considérée comme un impératif mondial.

Le développement durable répond à la nécessité : *i)* de trouver un meilleur équilibre entre les idées classiques sur la croissance économique et la conservation des ressources de l'environnement ; *ii)* d'améliorer l'équité au sein des générations et entre les générations sur les plans économique et environnemental ; et *iii)* de veiller à réaliser la viabilité écologique tant au niveau local qu'au niveau mondial. Ces définitions et affirmations soulèvent des difficultés à cause de leur caractère général et du

fait qu'elles n'offrent pas d'orientations pratiques aux gens de terrain ou aux décideurs. C'est pourquoi nous devons nous poser ce type de questions : Quelles activités en cours sont compatibles avec le développement durable ? Quelles dispositions sont requises pour assurer le développement durable ? Que cherche-t-on réellement à rendre durable ? Cette dernière question pourrait être interprétée du point de vue d'un service, d'une industrie ou purement et simplement des systèmes permettant la vie sur terre.

Le développement industriel durable passe par la mise au point continue, l'amélioration et l'utilisation de technologies propres en vue d'imprimer un changement radical dans les niveaux de pollution et dans la consommation des ressources. Il convient d'adopter de nouvelles stratégies pour gérer de façon durable le développement de l'industrialisation et de l'urbanisation à travers le monde. Comme tous les stades du cycle de vie d'un produit ou d'un procédé sont susceptibles d'avoir une incidence sur l'environnement, on pourrait recourir, afin de réduire les impacts sur l'environnement, à des principes de conception de procédés novateurs qui abordent ceux-ci dans leur globalité et tiennent compte de tous les aspects, depuis le choix et les quantités de matières premières jusqu'à l'amélioration de la valorisation au cours du traitement des déchets. Un procédé respectueux de l'environnement devrait en principe : *a*) consommer peu d'énergie et de matières premières non renouvelables (surtout les produits de départ constitués de combustibles fossiles) par rapport aux produits ou aux services fournis ; et *b*) réduire ou supprimer les déchets (y compris le recyclage de l'énergie et des matières et la consommation d'énergie). Aussi le premier objectif d'une stratégie visant à mettre en œuvre un tel procédé consisterait-il à maximiser *a*) et *b*), depuis les matières premières jusqu'à l'élimination finale des produits, en passant par la production et la consommation. La biotechnologie pourrait contribuer substantiellement à ces objectifs.

Mondialisation

On n'aura pas fait le tour de la question de la viabilité écologique de l'industrie sans aborder la mondialisation et les pays en développement, deux questions abondamment débattues, à la fois dans l'enceinte de l'OCDE et à l'extérieur. En l'absence d'une étude plus approfondie de ces questions essentielles, qui n'entre pas dans le cadre du présent rapport, quelques remarques devraient suffire.

La tendance à la mondialisation de l'économie planétaire et à l'internationalisation de la production font passer la portée de l'économie de l'échelon national à l'échelon mondial. Il importera donc de suivre la relation entre la mondialisation et le développement durable. Ces deux phénomènes coexistent-ils de façon harmonieuse ou discordante ? Par exemple, l'instauration de la production propre et de modes de consommation plus efficaces et, par suite, le renforcement des exigences des fabricants, des distributeurs et des consommateurs laissent prévoir une diminution de la demande de matières premières et de produits agricoles exportés et une montée des obstacles aux échanges due au protectionnisme écologique. Cette situation pourrait entraîner des problèmes commerciaux, notamment en ce qui concerne les exportations en provenance de pays en développement. Dans le secteur des produits chimiques, par exemple, la pratique de l'enquête de sécurité auprès du fournisseur et de l'évaluation du vendeur existe depuis plusieurs années, et les entreprises recourent de plus en plus à des audits d'environnement détaillés ou à des audits de la totalité du cycle de vie avant de passer commande. En l'occurrence, ce sont les forces du marché, et non les réglementations, qui commandent l'échelle et le rythme du changement.

En dehors de la question des échanges internationaux, la viabilité écologique de l'industrie est liée aussi à la délocalisation industrielle, aux stratégies de gestion environnementale des multinationales et aux attitudes des industries et des pouvoirs publics dans les pays industrialisés à l'égard de l'environnement. On a affirmé que les multinationales avaient déplacé leurs activités de fabrication polluantes et dangereuses dans des pays où la réglementation en matière d'environnement et le respect de sa mise en œuvre sont moins stricts. Une enquête menée par la Banque mondiale (Low, 1992) concluait qu'alors que « les différences nationales entre les réglementations d'environnement ne constituent pas la raison principale de la modification de la répartition des industries polluantes à l'échelle internationale », « dans les pays en développement, l'expansion des industries polluantes a

été plus rapide que celle de la moyenne de toutes les industries au cours des deux dernières décennies et plus rapide que dans les pays industrialisés». Dans ces circonstances, le transfert de technologies non ou moins polluantes peut être préconisé à titre de remède. Cependant, le problème se reporte alors sur la capacité de ces pays à assimiler des transformations technologiques et sociales d'envergure. Les petits pays en développement dont l'effectif de la population active n'atteint pas un seuil minimum et qui ne disposent pas d'autres ressources en quantités suffisantes risquent d'être empêchés de tirer profit des nouvelles possibilités de développement industriel viable.

SUR LA VOIE DE LA VIABILITÉ ÉCOLOGIQUE DE L'INDUSTRIE

La notion d'écosystème a été forgée au cours de la première moitié de ce siècle pour définir les interactions entre les organismes vivants et leur milieu physico-chimique. En outre, les écosystèmes ne sont pas isolés, mais interdépendants aux échelons locaux et régionaux, si bien qu'une atteinte locale à l'environnement risque de se répercuter à l'échelle planétaire. La portée de cette «connectivité» planétaire n'a été entièrement reconnue que récemment : «la fin du vingtième siècle marque un virage critique dans l'histoire écologique de la civilisation humaine. Pour la première fois ... les activités humaines, prises dans leur globalité, risquent de porter préjudice aux systèmes et processus biophysiques planétaires au point de mettre en danger la stabilité écologique mondiale et la sécurité géopolitique» (Rees, 1997). Ce que cela implique pour la viabilité écologique nous oblige à être attentifs au fait que l'homme est le consommateur dominant dans tous les écosystèmes du monde.

Dans le passé, les technologies de traitement des déchets industriels ont été encouragées aux dépens des stratégies à long terme qui auraient été nécessaires pour mener à bien la minimisation des déchets; les politiques de gestion s'attachaient au traitement et à l'élimination plutôt qu'à la réduction et au recyclage des déchets. Le développement d'une économie industrielle viable ne peut se concevoir que dans une optique planétaire et globale : planétaire parce que certains problèmes se rencontrent dans tous les pays (par exemple, les produits chimiques dangereux pour l'environnement, la pollution diffuse) ou franchissent les frontières nationales (par exemple, la pollution transfrontière, le changement climatique); globale parce que les problèmes d'environnement appellent une analyse systématique, la recherche de solutions et une hiérarchisation des actions, plutôt que des mesures restreintes, à court terme et au coup par coup.

Le concept de viabilité écologique de l'industrie repose sur une analogie entre les écosystèmes naturels et les systèmes industriels, qui les considère comme des parties d'un tout englobant l'ensemble de leurs interactions entre eux et avec l'environnement, et constitue un moyen de parvenir à la fois à la viabilité écologique de l'industrie et à la durabilité générale. Divers modèles de viabilité écologique de l'industrie ont été formulés (voir annexe 1.1). Ces modèles offrent une base pour améliorer l'efficacité des procédés industriels et, par là, leur propreté et leur viabilité.

Il est probablement très difficile d'assurer la viabilité écologique de l'ensemble de l'industrie, et même la mise en place d'écosystèmes quasi industriels n'est pas envisageable dans un avenir proche. Toutefois, plusieurs activités commerciales ont déjà intégré ces principes. En ce moment, elles concernent essentiellement des industries lourdes ou des secteurs dont les procédés dangereux pour l'environnement ont été bien répertoriés (Kirkwood et Longley, 1995). L'enjeu pour la biotechnologie consiste à fournir l'élan et les instruments nécessaires à une plus large pénétration du concept de viabilité écologique de l'industrie. Les solutions à court terme et au coup par coup ne sont plus acceptables pour traiter les problèmes d'environnement. «Le problème soulevé par cette démarche morcelée découle du fait qu'elle s'attelle à une succession de questions nouvelles sans avoir nécessairement résolu la ou les précédentes, laissant ainsi supposer qu'elles ne sont plus à l'ordre du jour. Un sujet retient toute l'attention et en laisse d'autres, non moins importants, dans l'ombre. Cette démarche ne considère pas non plus l'environnement comme un seul et même système, si bien qu'il devient pratiquement impossible de montrer à la population de quelle manière son comportement affecte l'environnement» (ministère néerlandais du Logement et de l'Environnement, cité par Johnson, 1997). La conséquence la plus importante de la prise en compte des préoccupations d'environnement dans la conception et les activités industrielles est l'adoption de l'analyse du cycle de vie (ACV), qui est présentée plus loin et traitée en détail au quatrième chapitre.

Encadré 1.4. **Biotechnologie et économies d'énergie au niveau des procédés**

Les scientifiques recherchent des extrémozymes résistantes capables de fonctionner à haute température. Ces enzymes opèrent néanmoins à des températures nettement inférieures à celles des procédés pétrochimiques ordinaires, et les conditions plus extrêmes de ces derniers, associées au fait qu'ils utilisent des matériaux plus exotiques et engendrent une proportion plus élevée de sous-produits (déchets), devraient entraîner une plus forte consommation d'énergie par unité de produit. Toutefois, le coût énergétique supplémentaire requis par le traitement thermochimique à haute température d'un produit d'alimentation pétrochimique est généralement plus que compensé par le coût énergétique de l'élimination de l'eau qui accompagne le flux de produits issu d'un procédé biotechnologique. Les avantages ou les inconvénients de la consommation d'énergie ne pourront être déterminés qu'à l'aide d'une ACV détaillée permettant de comparer tous ces facteurs.

QU'EST-CE QU'UNE TECHNOLOGIE PROPRE ?

Le sens que nous attribuons au concept de technologie propre s'inspire de la définition de la production propre par le PNUE (Clift et Longley, 1995), mais est plus étendu :

Technologie propre : approche théorique et pratique des activités industrielles qui implique que toutes les phases du cycle de vie d'un produit ou d'un procédé soient étudiées avec le souci de prévenir ou de réduire au minimum les risques à court et à long termes pour la santé humaine et l'environnement.

La prévention de la dégradation de l'environnement à la source représente la caractéristique essentielle d'une technologie propre. Les technologies plus propres vont dans cette direction. L'utilisation du terme « plus propre » a été critiquée par certains observateurs qui y voient l'expression d'un compromis, d'une position intermédiaire qui se détourne de l'idée d'un développement réellement compatible avec l'environnement. Néanmoins, dans les circonstances actuelles, il représente un objectif pragmatique et accessible, qui a été adopté par l'OCDE (1995b) :

« Il s'agit de technologies permettant : d'extraire et d'exploiter les ressources naturelles de façon aussi efficiente que possible à tous les stades du cycle de vie ; de réduire au minimum les rejets dans l'atmosphère, dans l'eau et dans le sol lors de la fabrication et de l'utilisation des produits ; et d'obtenir des produits durables qui peuvent être récupérés ou recyclés dans des proportions maximales. Par ailleurs, à tous les stades du cycle de vie, ces technologies offrent un rendement énergétique satisfaisant, autrement dit une production qui requiert des apports énergétiques aussi réduits que possible. »

L'imprécision qui peut entourer la définition de ces concepts ne doit pas être considérée comme une faiblesse : leur fonction essentielle consiste à susciter une réflexion nouvelle qui favorisera l'émergence de technologies propres. L'adoption de ces dernières supposera que l'on reconsidère notre planète sous un angle profondément différent, en envisageant des actions intégrées, de portée mondiale et assorties d'effets durables. Les objectifs de la technologie propre sont assimilables à ceux de la viabilité écologique de l'industrie.

Ainsi que Green et Irwin (1996) et d'autres l'ont souligné, les publications techniques brossent un tableau optimiste des avantages économiques des technologies propres (économies de produits de départ, d'eau et d'énergie ; diminution du coût du traitement de la pollution ; nouveaux produits et procédés ouvrant des débouchés supplémentaires ; stimulation de l'innovation technologique). Dans ces conditions, pourquoi l'adoption des technologies propres n'a-t-elle pas été plus étendue ? Plusieurs raisons ont été invoquées : les traitements en bout de chaîne demeurent les moins chers ; les autorités chargées de la réglementation continuent de se préoccuper des symptômes plutôt que des causes de la pollution ; les parties concernées estiment que les investissements ne sont rentables qu'à long terme ; il est nécessaire d'amortir les installations existantes ; il y a un manque d'informations ; l'efficacité par rapport au coût n'a pas été établie (la commercialisation des nouveaux produits et

procédés se heurtant par exemple à des difficultés); et le degré de disponibilité de technologies propres acceptables. Mais des progrès sensibles ont été enregistrés en direction de la reconnaissance et de la mise en pratique du concept de technologie propre, comme l'illustre le tableau 1.1.

Tableau 1.1. **Progrès marqués par les actions des entreprises dans le domaine de l'environnement**

| Tendances | Sociétés |
|---|--|
| 1. Révision fondamentale des concepts de « jetabilité », de risque, de responsabilité et de droit de polluer | 3M, Monsanto, Dow Chemical |
| 2. Adoption à plus grande échelle de mesures relatives à l'environnement et participation d'associations professionnelles | Monsanto, Dow, ICI, Westinghouse, Chevron, 3M, McDonald's, Bell Canada, Responsible Care, Chambre de commerce internationale, Keidanren, Baum, S.C. Johnson |
| 3. Généralisation de l'analyse globale du coût complet et de l'impact; analyse du cycle de vie; audit global d'environnement | AT&T, Procter et Gamble, Esprit, Smith & Hawken, The Body Shop, Patagonia, Ben & Jerry's |
| 4. Expériences d'écologie industrielle | Novo Nordisk, Kemira, Statoil, Asnaes (Kalundborg) |
| 5. Collaboration entre des entreprises et des organisations de protection de l'environnement | Fuji Photo Film et Audubon Safeway et Earth Island Inst., McDonald's et Environmental Defense Fund, Merck et Institut national de la biodiversité du Costa Rica, New England Electric Utilities et National Defense Council et Conservation Law Foundation |
| 6. Plus grand intérêt du conseil d'administration pour une gestion durable | DuPont, Novartis, ICI, Monsanto, Henkel, Ferris Industries |
| 7. Plus grande responsabilisation en matière d'environnement, sous la pression des accidents survenus | Union Carbide, Exxon, Sandoz |
| 8. Renforcement de la responsabilité juridique réelle ou potentielle pour les dommages causés à l'environnement en cas d'accident | Union Carbide, Exxon, Shell, General Electric, Allied Signal |

Source : Fischer et Schot, 1993.

Éléments moteurs de l'adoption de technologies propres

Dans la plupart des cas, les technologies non polluantes sont spécifiques d'un procédé et même d'un type de procédé au sein d'une entreprise particulière. Étant donné que la conception et le développement des technologies propres s'effectuent généralement à l'intérieur des entreprises, il est difficile d'apprécier leur impact économique global pour un secteur industriel. Les technologies propres sont susceptibles de remplacer des technologies de protection de l'environnement (par exemple un traitement en bout de chaîne) ou d'être adoptées lors de la mise en service d'un nouveau procédé de production qui réduit les coûts par rapport à l'ancien. Elles peuvent également améliorer la performance du procédé ou la qualité du produit. Les investissements consacrés aux technologies propres visent généralement à améliorer la qualité du produit et le coût d'exploitation du procédé et à satisfaire à la législation sur l'environnement. La mise en œuvre de technologies propres par l'industrie est stimulée par plusieurs facteurs, notamment la compétitivité économique, les mesures adoptées par les pouvoirs publics et l'intérêt public.

Compétitivité économique

Les entreprises évaluent les avantages des produits et procédés propres en fonction des débouchés et/ou de la différence de coût. En outre, selon leur position sur le marché et leur degré

d'innovation technologique, les entreprises opéreront des choix stratégiques à propos du développement des technologies propres pour des raisons défensives ou offensives. La détermination de certains avantages économiques de l'adoption de procédés propres risque de poser des difficultés, notamment pour estimer les coûts de l'adoption par rapport à la probabilité du risque (par exemple, éviter des frais de procédure lorsque des matières ou des pratiques dangereuses sont en jeu). Les dépenses consacrées aux technologies non polluantes dans les années 90 sont estimées à 140 milliards de livres (240 milliards de dollars) pour le seul Royaume-Uni, tandis que les dépenses encourues par les pays de l'Union européenne pourraient dépasser le budget actuel de R-D de l'industrie chimique européenne (Clark, 1995). Les possibilités d'introduire de nouvelles technologies et d'entreprendre des recherches axées sur des procédés chimiques respectueux de l'environnement sont claires. Pour déterminer la contribution économique des procédés biotechnologiques à la production plus propre, on a analysé la part de marché totale des entreprises de biotechnologie dans chaque secteur (voir le deuxième chapitre).

Trois catégories de contribution des produits biotechnologiques au marché peuvent être distinguées :

- *Vente de nouveaux produits directement issus de l'utilisation de la biotechnologie moderne.* Il s'agit notamment de produits innovants modifiés par la technologie de l'ADN recombiné (par exemple des semences ou des produits biopharmaceutiques génétiquement modifiés), et de produits et procédés qui s'inspirent directement du fonds de connaissances sur la biotechnologie moderne (par exemple, de nouveaux services d'environnement et des produits de chimie fine à usage pharmaceutique).
- *Vente de produits fabriqués à l'aide de procédés améliorés qui utilisent directement la biotechnologie moderne (impact direct)* (par exemple, l'insuline produite par recombinaison). Dans ce cas, la biotechnologie moderne s'applique au procédé de fabrication, mais le produit final n'est pas modifié. Cette catégorie exclut les produits fabriqués à l'aide d'agents de transformation achetés (par exemple des enzymes).
- *Vente de produits fabriqués à l'aide de procédés améliorés exploitant les produits de la biotechnologie moderne appliquée dans d'autres industries (impact indirect ou secondaire).* Cela consiste à améliorer l'efficacité de procédés de fabrication par l'acquisition de nouveaux agents de transformation (par exemple des enzymes) et à accroître la valeur des produits finaux par l'utilisation de nouveaux ingrédients.

Ces trois catégories rassemblées représentent la totalité des ventes associées à la biotechnologie (VAB).

Action des pouvoirs publics

La stratégie des industries consiste à faire en sorte que leurs activités n'outrepassent pas les limites juridiques convenues à l'avance, afin de réduire au minimum leur responsabilité et la modification de leurs pratiques d'exploitation. On a avancé que l'intervention des pouvoirs publics était susceptible d'avoir une incidence favorable sur la compétitivité d'un pays et qu'à long terme celle-ci serait d'autant plus grande que les mesures appliquées étaient strictes (voir OCDE 1994; le sixième chapitre du présent rapport et son annexe; et Management Institute for Environment and Business, 1994, pour des études de cas). En 1990, les pays Membres de l'OCDE ont investi environ 100 milliards de dollars dans la protection de l'environnement, la grande majorité de cette somme étant absorbée par la mise en conformité avec les réglementations sur l'environnement.

Intérêt public

La pression exercée par le public sensibilisé est un puissant vecteur de changement pour une gamme étendue de questions d'environnement. Le public peut avoir vis-à-vis des entreprises des exigences allant au-delà du respect de la réglementation, lorsqu'il estime que leurs produits et procédés ne répondent pas à ses attentes «écologiques». Aussi l'acquisition d'une légitimité

écologique peut-elle revêtir une importance stratégique pour l'industrie. De nombreuses firmes diffusent régulièrement des rapports sur l'état de l'environnement pour satisfaire à la demande des actionnaires et aux attentes du public. Les produits «verts» détiennent une valeur marchande supérieure.

REMPLIR LES OBJECTIFS DE VIABILITÉ ÉCOLOGIQUE DE L'INDUSTRIE : LA BIOTECHNOLOGIE PLACÉE DANS SON CONTEXTE

Usages industriels de la biotechnologie

L'approfondissement de notre compréhension de la complexité du vivant, que ce soit du point de vue de la génétique, de l'organisme ou de l'écosystème, étaye solidement la biotechnologie. La biotechnologie couvre un large éventail d'applications, qui peuvent servir à améliorer les fermentations réalisées à grande échelle par des organismes vivants pour produire des substances telles que l'éthanol, à une extrémité de la gamme, ou consister à utiliser de très petites parties de molécules biologiques comme capteurs dans des dispositifs d'analyse, à l'autre extrémité. Par conséquent, il est important de reconnaître que très peu de truismes valent pour toutes les applications, qu'aucune étude de cas ne s'applique à toutes les industries et qu'il n'existe aucune tendance indéniable concernant l'ensemble des secteurs industriels.

Les applications industrielles de la biotechnologie moderne ont été pendant de nombreuses années des retombées des investissements réalisés dans la biotechnologie médicale. Comme il était rare de voir les besoins en matière de procédés industriels et de développement de produits directement servis par les acquis scientifiques et technologiques de l'industrie pharmaceutique, la biotechnologie a pénétré plus lentement dans les autres industries. De fait, la biotechnologie industrielle a tellement stagné qu'aux yeux des investisseurs de Wall Street, la «biotechnologie» se confond souvent avec la biotechnologie médicale. Cependant, les applications de la biotechnologie ont progressé dans de nombreux secteurs industriels au cours de ces dernières années (voir le deuxième chapitre) et certains types d'utilisations commencent à émerger, ce qui laisse supposer que cette technologie aura un impact économique appréciable dans l'avenir.

La biotechnologie offre la possibilité de produire rapidement et de façon contrôlée des catalyseurs biologiques composés d'organismes vivants ou de leurs éléments constitutifs dotés d'une activité catalytique. L'intérêt des biocatalyseurs découle du fait qu'ils permettent à l'industrie d'obtenir des procédés et produits plus propres et qu'ils sont plus spécifiques et plus sélectifs que leurs homologues non biologiques. Autrement dit, les biocatalyseurs sont à même d'engendrer moins de sous-produits (spécificité) et d'utiliser des produits de départ moins purifiés (sélectivité). En outre, les biocatalyseurs s'auto-propagent, si bien qu'ils peuvent être mis à profit dans des opérations à faible valeur ajoutée, comme le traitement des déchets.

Bien que les catalyseurs biologiques présentent des avantages, leur application industrielle pose aussi quelques problèmes qui ont, jusqu'à une date récente, souvent surpassé leurs avantages. Les problèmes majeurs des biocatalyseurs tiennent à leur fragilité, à leur consommation d'eau élevée, à leur faible productivité volumétrique et à leur coût. Bon nombre de ces problèmes ont été résolus grâce à la conception de nouveaux bioréacteurs et à des programmes d'amélioration des catalyseurs. Ce qui nous amène à mentionner l'un des principaux avantages des biocatalyseurs : ils sont toujours perfectibles. Cependant, alors que les obstacles techniques sont en voie de résorption, de nombreuses industries, fortement attachées à leur tradition de technologie physique et chimique, continuent de freiner sérieusement l'adoption à plus grande échelle de la biotechnologie.

Dans n'importe quel secteur industriel, les domaines sur lesquels la biotechnologie a un impact potentiel peuvent se situer tout au long des étapes successives qui ajoutent de la valeur, depuis les produits de départ jusqu'à l'utilisation du produit, en passant par la transformation et la gestion des déchets. Les produits de départ de remplacement, par exemple, en particulier les produits de départ renouvelables ou durables, sont quelquefois plus accessibles par voie biotechnologique que par voie chimique. Des études pilotes ont été lancées, notamment, en vue de produire de l'acide succinique et des polyols à partir de ressources agricoles au lieu des produits d'alimentation traditionnels d'origine

pétrochimique. Ces procédés associent des méthodes chimiques traditionnelles à la biotechnologie afin de convertir des ressources biologiques en produits chimiques de base. Les méthodes biotechnologiques sont également employées pour améliorer les produits d'alimentation du secteur énergétique, où la biodésulfuration du pétrole apparaît comme un procédé de substitution viable et moins polluant aux méthodes chimiques, et fait actuellement l'objet d'essais pilotes.

La modification des produits de départ peut se répercuter sur les produits finaux, qui subissent quelquefois une transformation radicale. Dans d'autres cas, il est possible d'élever le rendement d'un processus en y introduisant une étape biotechnologique, sans modifier les produits de départ et d'arrivée. Des exemples de ces processus apparaissent dans des secteurs très divers de l'économie, comme les produits chimiques, les pâtes et papiers, les produits alimentaires et les textiles.

Les nouveaux produits de la biotechnologie industrielle comprennent des produits plus performants, comme des polymères biodégradables, des substances chimiques possédant une activité optique et des enzymes utilisées dans les détergents et les aliments pour animaux. Les catalyseurs biologiques offrent la possibilité de développer des produits plus « intelligents », qui présentent une plus grande fonctionnalité à des prix pratiquement équivalents à ceux des produits qu'ils remplacent.

Dans le contexte du présent rapport, il est important de reconnaître deux choses, à savoir que : *i)* percevoir la biotechnologie comme une technologie appropriée et non polluante est certes fondé, mais quelque peu simpliste, et que *ii)* la nature polymorphe de la biotechnologie peut rendre difficile l'évaluation de son impact dans différents secteurs industriels. Dans le cas de l'industrie du papier, par exemple :

- la biotechnologie permettra d'obtenir des arbres fournissant un meilleur bois à pâte (renfermant moins de lignine ou des lignines différentes, dotés d'une structure fibreuse modifiée et à rendement supérieur), ce qui se reflétera sur la qualité du papier et la capacité de production ;
- la délignification activée par biopulpage et les enzymes qui favorisent l'égouttage de l'eau au cours du séchage améliorent la qualité du papier (stabilité des couleurs, résistance) et diminuent aussi la consommation d'énergie pour un rendement donné ;
- le désencrage biologique remplacera le désencrage mécanique en procurant une économie d'énergie qui n'a pas encore été chiffrée ;
- le blanchiment biologique est en train de remplacer l'emploi de produits chimiques nuisibles à l'environnement ;
- l'élimination enzymatique du biofilm réduit la durée de fabrication ainsi que les coûts ;
- les points mentionnés ci-dessus, ajoutés au traitement biologique de l'eau, permettent d'ores et déjà à certaines papeteries de recycler 100 pour cent de leur eau.

Ainsi, l'énergie, l'environnement, les coûts, la qualité, la productivité et des facteurs réglementaires peuvent être considérés comme des incitations à l'innovation biotechnologique. La réponse à la question de savoir quelle est l'incitation la plus forte dépendra probablement de l'industrie concernée : dans le cas du papier, la réaction de l'industrie est motivée par le désir d'accroître sa productivité et de se conformer à des réglementations de plus en plus sévères.

La comparaison entre la propreté de la biotechnologie et celle de la technologie chimique, par exemple, est trompeuse, voire contre-productive. La biotechnologie n'est pas nécessairement propre en elle-même, pas plus que la technologie chimique n'est systématiquement polluante. Des comparaisons valables entre des technologies ou des procédés concurrents ne pourront être conduites qu'à travers des analyses du cycle de vie judicieusement conçues et l'application de critères identiques, objectifs et globaux. Il est indiscutable que la biotechnologie possède des qualités qui lui confèrent un grand attrait du point de vue de la viabilité écologique de l'industrie. Le biopulpage aux enzymes qui diminue la demande d'énergie et la pollution associées à la mise en pâte du bois et l'utilisation de biocatalyseurs pour produire des intermédiaires chimiques spécifiques destinés à la synthèse de produits industriels et pharmaceutiques moins polluants et plus sûrs, constituent deux exemples de la polyvalence de la biotechnologie dans ce contexte. La biotechnologie présente l'avantage particulièrement important de produire des substances chimiques chirales. Les procédés chimiques engendrent

généralement des mélanges racémiques (voir cependant l'annexe 1.2 : Innovations en matière de chimie propre). La biocatalyse, en revanche, permet d'obtenir un énantiomère pur ou de dissocier des mélanges racémiques, et d'éviter ainsi le recours à des procédés de séparation complexes. La préparation d'isomères optiques purs est capitale pour la mise au point de nouveaux médicaments et pesticides, notamment lorsque la forme inactive de la substance risque d'être dangereuse (cas de la thalidomide, par exemple), outre que sa production entraîne un gaspillage de matières premières.

Chimie non polluante

L'industrie chimique a souvent eu une image négative auprès du public, qui continue d'être alimentée par des préoccupations relatives à ses mauvais résultats en matière d'environnement, aux risques associés à la fabrication et au transport et à sa production de déchets. Dans l'industrie chimique, les déchets proviennent des produits de départ et/ou d'impuretés présentes dans ceux-ci, de la ou des réaction(s), des produits chimiques auxiliaires, des étapes de séparation et de purification et de la consommation d'énergie. S'agissant des réactions, celles qui produisent des quantités stoechiométriques de déchets posent des problèmes tant que le sous-produit ne peut pas être utilisé. Les sous-produits peuvent aussi résulter de réactions secondaires (exemple des procédés chimiques intervenant dans la production d'acrylamide qui génèrent des sulfates ou de l'acide acrylique). L'impact financier de la minimisation des déchets peut être substantiel (voir encadré 1.5).

Encadré 1.5. Conséquences financières de la minimisation des déchets

Examinons l'avantage de coût (exprimé en termes de coût des produits vendus) des mesures de minimisation des déchets prises par une grande firme pharmaceutique et par une petite entreprise agrochimique. La partie supérieure du tableau ci-dessous indique le niveau de référence du coût des produits vendus et des bénéfices, tandis que la partie inférieure montre l'effet d'une économie de 5 pour cent sur le coût des produits vendus obtenue par la minimisation des déchets. Les coûts relatifs des matières premières et des produits consommables varient selon l'activité de fabrication et les augmentations de bénéfices reflètent la réduction du coût des produits vendus. Toutefois, dans chaque cas, la conclusion est évidente : un investissement modeste dans la minimisation des déchets peut procurer des avantages de coût appréciables.

Avantages financiers de la minimisation des déchets dans la production chimique

| Société | Ventes (milliards de dollars) | Coût des produits vendus (%) | Bénéfices ¹ (milliards de dollars) | Bénéfices (% des ventes) | Accroissement des bénéfices (%) |
|---|-------------------------------------|------------------------------------|---|-----------------------------|---------------------------------------|
| Coût des produits vendus et bénéfices | | | | | |
| GP | 7.477 | 23.7 | 1.1300 | 15.1 | |
| PA | 0.060 | 48.3 | 0.0035 | 5.9 | |
| Effet d'une économie de 5 % sur le coût des produits vendus réalisée grâce à la minimisation des déchets | | | | | |
| GP | 7.477 | 22.5 | 1.2190 | 16.3 | 7.88 |
| PA | 0.060 | 46.0 | 0.0049 | 8.2 | 40.00 |

GP = grande firme pharmaceutique; PA = petite entreprise agrochimique.

1. Bénéfices avant intérêts et impôts.

Source : Braithwaite, 1995.

Les pouvoirs publics, les organismes de recherche, les organisations intergouvernementales et non gouvernementales et l'industrie chimique elle-même ont pris des initiatives en vue de promouvoir les produits et procédés non polluants. Il s'agit notamment du Groupe sur la prévention et le contrôle de la pollution de l'OCDE, des groupes de travail sectoriels du PNUE sur la production plus propre dans les pâtes et papiers, les textiles, le tannage et la pétrochimie, de l'initiative SUSTECH pour une fabrication moins polluante du Conseil européen de l'industrie chimique et de l'initiative de *Responsible Care*, destinée à améliorer tous les aspects ayant trait à la santé, à la sécurité et à la protection de l'environnement. Dans plusieurs pays, la participation à cette initiative est une condition préalable à l'affiliation aux associations professionnelles de l'industrie chimique. Plusieurs pays de l'OCDE ont mis sur pied des programmes de recherche fondamentale portant sur des questions telles que la catalyse, la simplification des procédés de synthèse, la fabrication des produits par d'autres voies et la production d'intermédiaires toxiques *à la demande*. L'annexe 1.2 contient des exemples illustratifs de nouvelles opportunités en chimie non polluante, dans le domaine des catalyseurs, des milieux réactionnels, des matériaux de support, et des activateurs de réaction.

Détermination du degré de « propreté » des procédés industriels

L'analyse du cycle de vie est une méthode permettant d'effectuer des évaluations comparatives de technologies totalement différentes, de comparer une activité ou un procédé classique avec une version améliorée, et d'évaluer des produits et procédés de substitution. Elle représente un outil de base pour répondre à la question : « quel est le degré de propreté d'une technologie ? ». L'adoption du concept de cycle de vie encourage les entreprises à étudier les produits de façon systématique et globale tout au long de leur cycle de vie (« du berceau à la tombe ») plutôt que de se concentrer uniquement sur l'étape de la fabrication. Ce type d'analyse permet de :

- déterminer si un procédé, produit ou service réduit effectivement la contrainte sur l'environnement ou s'il la reporte simplement en amont au niveau des fournisseurs de ressources ou en aval au niveau du traitement ou de l'élimination ;
- mettre en évidence l'étape d'un procédé qui exerce l'impact le plus prononcé sur l'environnement ;
- pratiquer des comparaisons quantitatives entre plusieurs variantes d'un procédé ou entre des technologies concurrentes.

Encadré 1.6. Analyse du cycle de vie

En 1993, l'analyse du cycle de vie (ACV) a été définie par la SETAC (*Society of Environmental Toxicology and Chemistry*) en ces termes : « ... une méthode servant à évaluer la pression exercée sur l'environnement par un produit, un procédé ou une activité, par la détermination et la quantification de la conversion énergétique, des matières utilisées, et des déchets rejetés dans l'environnement, en vue d'apprécier les impacts de cette consommation d'énergie et de matières et de ces rejets dans l'environnement, et de mettre en évidence et d'évaluer les possibilités de réaliser des progrès en matière d'environnement ».

L'identification des « questions clés » est une étape importante dans l'amélioration de la fiabilité des ACV. En un sens, les « questions clés » se rapportent à la détermination des priorités de la R-D, en fonction des améliorations de produits et de procédés qui laissent entrevoir les plus grands avantages pour l'environnement. Ce terme s'emploie également pour définir l'étude de la fiabilité de l'ACV, notamment en ce qui concerne l'inventaire, c'est-à-dire l'examen systématique de chaque étape du cycle de vie en vue d'améliorer la fiabilité de l'évaluation.

Diverses organisations ont mis au point des instruments de gestion destinés à améliorer les performances en matière d'environnement. A titre d'exemple, le Système communautaire de management environnemental et d'audit (EMAS) de la Commission européenne a été introduit en vue d'offrir une procédure volontaire d'audit d'environnement, comprenant un instrument de gestion interne destiné à surveiller les performances et un indicateur externe de performance. L'EMAS met l'accent sur des questions telles que l'éco-efficience et la production moins polluante, sans se préoccuper véritablement des cycles de vie ni des effets sociaux et environnementaux indirects. Alors que l'EMAS ne date que de 1995, d'aucuns préconisent de le remplacer par une méthode d'ACV et de le faire évoluer vers une normalisation du type ISO.

Limites de l'ACV

Bien que le quatrième chapitre aborde l'analyse du cycle de vie plus en détail, il convient d'insister sur un autre point du sujet : les limites de l'analyse. La définition des extrémités de l'ACV revêt deux aspects. Premièrement, quelles sont les limites de l'ACV proprement dite, et deuxièmement, dans quelle mesure l'ACV doit-elle inclure des paramètres économiques et/ou des facteurs de risque? Dans certains cas, il ne sera pas nécessaire d'inclure toutes les étapes du cycle de vie; par exemple, l'étape de la gestion des déchets pourra être laissée de côté si on a l'intention d'évaluer les matières depuis leur origine jusqu'à la porte de l'usine. En aval, quelle pondération pourrait-on attribuer aux déchets et aux produits économiquement et techniquement susceptibles de recyclage, à ceux qui sont recyclables du point de vue technique, mais pas du point de vue économique et à ceux qui ne sont pas recyclables et qui donnent lieu à une perte dissipative? Dans les activités industrielles actuelles, de nombreuses matières entrent dans la dernière catégorie.

Encadré 1.7. Limites de l'ACV

Le point de départ et le point final d'un processus d'ACV en plusieurs étapes sont appelés les limites de l'ACV. Leur position est laissée au choix de celui qui conduit l'analyse et peut être déterminée par toutes sortes de facteurs externes. C'est particulièrement vrai dans le cas de procédés biologiques tels que la production de biocarburants, où il convient de se demander quels activités et procédés doivent être considérés comme faisant partie du système de production, d'une part, et de l'environnement en général, d'autre part. Lorsqu'on les considère comme faisant partie du système de production, la lumière solaire, la fertilité du sol, le CO₂, l'eau, etc., sont des intrants, mais lorsqu'on les considère comme faisant partie de l'environnement, la biomasse constitue l'intrant.

La question de savoir jusqu'à quel point l'évaluation devrait remonter en amont du procédé se pose également; l'évaluation de produits de départ naturels ou de leur production pourrait révéler des problèmes insoupçonnés au stade de l'origine, comme dans le cas de la production de biogazole à partir de l'huile de colza (Bull, 1996). Indépendamment de la propreté du produit au stade de la consommation et de l'utilisation des sous-produits (tourteau, glycérol), la culture à très grande échelle risque de soulever deux problèmes en amont : le large pouvoir allergène du pollen et, comme les brassicacées forment rarement des associations mycorhiziennes, un appauvrissement éventuel du sol et la perte des inoculum mycorhiziens du sol après une culture prolongée. L'ACV ne tient pas compte des facteurs économiques, mais cette question mérite d'être approfondie. Guinee *et al.* (1993), par exemple, ont soutenu que de par sa nature quantitative, l'ACV pouvait permettre un arbitrage entre l'impact sur l'environnement et d'autres éléments, notamment les facteurs de coût. En outre, la technologie propre se confond pour certains avec la réduction des risques, le rendement d'utilisation des ressources et la minimisation des déchets. Cela étant, dans quelle mesure faudrait-il incorporer

une évaluation des risques dans l'ACV? Guinee *et al.* font valoir que l'ACV porte sur les intrants et les extrants réels du système étudié et que les petits incidents qui surviennent au cours des processus intermédiaires peuvent être pris en compte par des moyennes annuelles. Elle ne couvre pas les risques intrinsèques des procédés. L'évaluation des risques, en revanche, intègre les événements rares à fort impact. Par conséquent, le présent rapport n'abordera pas les questions liées aux risques dans la partie consacrée aux méthodes fondées sur le cycle de vie.

CONCLUSION : UN RÔLE CROISSANT POUR LA BIOTECHNOLOGIE

La présente étude est probablement la première à offrir une vue d'ensemble du mode de pénétration des procédés biotechnologiques modernes dans les opérations industrielles. On peut considérer que l'arrivée de la « biotechnologie moderne » correspond à l'introduction des enzymes et des techniques de l'ADN recombiné dans les procédés commerciaux. La tendance qui se dégage des données éparses dont on dispose sur la biotechnologie industrielle paraît typique de l'adoption de n'importe quelle nouvelle technologie par la société, phénomène qui est très étudié depuis plusieurs années. Qu'il s'agisse du moteur à combustion interne ou du transistor, on retrouve la même évolution au cours du temps : une phase d'installation sur le marché qui dure environ une dizaine d'années, une période de croissance rapide de quelque deux décennies, suivie par une période de maturation au cours de laquelle la croissance ralentit. Il serait intéressant de trouver le moyen d'établir une distinction entre une technologie qui se trouve au début de sa phase d'installation sur le marché et une technologie qui n'apportera jamais de changements vraiment majeurs et de très large portée. En biotechnologie, on observe beaucoup d'exemples d'applications relativement petites, largement réparties sur de nombreuses industries différentes. Certaines applications réussies sont exploitées depuis plus de cinq ans, d'autres depuis dix ans peut-être, mais leur avenir demeure encore incertain. Il existe manifestement des créneaux dans lesquels la biotechnologie industrielle présente des avantages économiques et environnementaux indéniables par rapport aux technologies existantes et où la poursuite de son développement ne rencontre pas d'obstacles majeurs. En même temps, la portée des applications biotechnologiques continue à s'étendre et cette capacité de perfectionnement doit en fin de compte inciter l'observateur averti à prévoir qu'elles auront un impact très marqué sur de nombreux aspects de l'industrie.

Si nous admettons que la biotechnologie est susceptible de se répandre assez largement dans les industries manufacturières, encore faut-il savoir si les procédés de fabrication fondés sur la biotechnologie seront sensiblement moins polluants que leurs analogues non biotechnologiques. L'attribution *a priori* d'une plus grande propreté aux systèmes biotechnologiques découle des observations suivantes : les processus chimiques qui s'accomplissent dans des systèmes vivants sont relativement plus efficaces que ceux qui sont conduits dans des usines chimiques, et les déchets qu'ils engendrent tendent à être recyclables et biodégradables. Par ailleurs, les activités humaines menées au siècle dernier s'accompagnaient incontestablement d'une quantité de déchets et de pollution substantielle, alors que la majorité des fabrications s'appuyait entièrement sur des processus biologiques. Ce qui a évolué, c'est notre capacité à manipuler des matériaux et des procédés biologiques par le biais de la biotechnologie. Le quatrième chapitre montre que dans plusieurs cas où il est possible de comparer un procédé biotechnologique existant avec son analogue non biotechnologique, la biotechnologie autorise des procédés moins polluants, mais il est trop tôt pour affirmer qu'il s'agit là d'une tendance générale et systématique.

BIBLIOGRAPHIE

- ANON. (1997), « All's Fair in Larvae War », *Chemistry and Industry*, 19 mai, p. 371.
- BRAITHWAITE, M.J. (1995), « Waste Minimisation – the Industrial Approach », dans J.H. Clark (éd.), *Chemistry of Waste Minimisation*, p. 17, Blackie Academic and Professional, Londres.
- BRUNDTLAND, G. (1987), *Our Common Future*, Oxford University Press, Oxford (en français : *Notre avenir à tous*, Éditions du Fleuve, Montréal, 1998).
- BULL, A.T. (1996), « Biotechnology for Environmental Quality: Closing the Circles », *Biodiversity and Conservation* 5, pp. 1-25.
- BULL, A.T., G. HOLT et M.D. LILLY (1982), *Biotechnologie – Tendances et perspectives internationales*, OCDE, Paris (épuisé).
- CLARK, J.H. (éd.) (1995), *Chemistry of Waste Minimisation*, Blackie Academic and Professional, Londres.
- CLIFT, R. et A.S. LONGLEY (1995), « Introduction to Clean Technology », dans R.C. Kirkwood et A.J. Longley (éd.), *Clean Technology and the Environment*, p. 174, Chapman and Hall, Londres.
- FISCHER, K. et J. SCHOT (éd.) (1993), *Environmental Strategies for Industry. International Perspectives on Research Needs and Policy Implications*, Island Press, Washington, DC.
- GEISER, K. et M. CRUL (1996), « Greening of Small and Medium-sized Firms: Government, Industry and NGO Initiatives », dans P. Groenewegen et al. (éd.), *The Greening of Industry. Resource Guide and Bibliography*, p. 213, Island Press, Washington, DC.
- GRAEDEL, T. (1997), « Industrial Ecology: Definition and Implementation », dans R. Socolow et al. (éd.), *Industrial Ecology and Global Change*, p. 23, Cambridge University Press, Cambridge.
- GREEN, K. et A. IRWIN (1996), « Clean Technologies », dans P. Groenewegen et al. (éd.), *The Greening of Industry: Resource Guide and Bibliography*, p. 169, Island Press, Washington, DC.
- GUINEE, S.B., H. HEIJUNGS, U. DE HAES, et G. HUPPES (1993), « Quantitative Life Cycle Assessment of Products 1: Goal Definition and Inventory », *Journal of Cleaner Production* 1, pp. 3-13.
- HALL, S. et N. ROOME (1996), « Strategic Choices and Sustainable Strategies », dans P. Groenewegen et al. (éd.), *The Greening of Industry: Resource Guide and Bibliography*, p. 9, Island Press, Washington, DC.
- JOHNSON (1997), *Green Plans: Greenprint for Sustainability*, University of Nebraska Press, Lincoln, Nebraska.
- KIRKWOOD, R.C. et A.J. LONGLEY (1995), *Clean Technology and the Environment*, Chapman and Hall, Londres.
- LOW, P. (éd.) (1992), « International Trade and the Environment », World Bank Discussion Paper No. 159, Banque mondiale, Washington, DC.
- MANAGEMENT INSTITUTE FOR ENVIRONMENT AND BUSINESS (with the US Environmental Protection Agency) (1994), *The Competitive Implications of Environmental Regulations: A Study of Six Industries*, MEB, Washington, DC.
- OCDE (1994), *La biotechnologie pour un environnement propre : prévention, détection, dépollution*, OCDE, Paris.
- OCDE (1995a), *Bioremediation: The Tokyo '94 Workshop*, OCDE, Paris.
- OCDE (1995b), *Production et produits moins polluants : vers une mutation technologique en vue d'un développement durable*, OCDE, Paris.
- OCDE (1996), *Wider Application and Diffusion of Bioremediation Technologies. The Amsterdam '95 Workshop*, OCDE, Paris.
- OCDE (1997), *Biotechnology for Water Use and Conservation. The Mexico '96 Workshop*, OCDE, Paris.
- PODILA, G.K. et D.F. KARNOSKY (1996), « Fibre Farms of the Future: Genetically Engineered Trees », *Chemistry and Industry*, 16 décembre, pp. 976-981.
- REES, E. (1997), « Urban Ecosystems: the Human Dimension », *Urban Ecosystems* 1, pp. 63-75.

APPLICATIONS INDUSTRIELLES ACTUELLES DE LA BIOTECHNOLOGIE*

- Des processus biotechnologiques sont exploités à l'heure actuelle dans une gamme étendue de procédés industriels d'importance.
- Les applications tendent à être spécifiques d'un secteur industriel; le présent rapport couvre les produits chimiques et pharmaceutiques, les pâtes et papiers, les textiles et le cuir, les aliments pour l'homme et les animaux, les métaux et les minéraux, et l'énergie.
- La compétitivité économique de diverses applications biotechnologiques visant à obtenir des procédés propres a été établie.
- Des procédés biotechnologiques ont été intégrés avec succès dans des opérations à grande échelle.
- Les progrès des techniques de l'ADN recombiné ont accru la pénétration de la biotechnologie dans l'industrie.
- Les processus biotechnologiques donnent lieu à des procédés moins polluants qui engendrent moins de déchets et consomment parfois moins d'énergie.

INTRODUCTION

La biotechnologie englobe une gamme étendue de techniques qui, prises séparément, ne s'appliquent jamais à tous les secteurs industriels. Néanmoins, la biotechnologie se prête à tellement d'applications que de nombreuses industries qui n'avaient pas fait appel à la biologie jusqu'à présent envisagent sérieusement de franchir le pas. Certains modes d'utilisation commencent à s'imposer, ce qui laisse supposer que cette technologie aura un impact économique sensible à l'avenir. De surcroît, les préoccupations relatives au réchauffement de la planète et aux émissions de CO₂ seront susceptibles d'avoir un incidence à cet égard. Toutefois, les applications industrielles se heurtent à plusieurs problèmes. Par exemple, l'infrastructure en place dans les industries qui ont traditionnellement fait appel à des technologies chimiques et physiques représente un défi de taille pour l'adoption à plus

* Le présent chapitre a été rédigé sous la responsabilité générale du Dr B. Marrs, président, Photosynthetic Harvest, Inc. (États-Unis), avec la collaboration du Dr H. Doddema et de M.B. de Hoop, TNO (Pays-Bas) pour les informations économiques et statistiques. La liste des collaborateurs est reproduite ci-après : *produits chimiques industriels*, Dr R. Dorsch, DuPont (États-Unis); *médicaments et autres produits de chimie fine*, Dr S. Takahashi, Kaneda (Japon) et Dr D. Anton, DuPont (États-Unis); *pâtes et papiers*, Dr M. Akhtar, Biopulping International (États-Unis); *textiles*, Dr K. Clarkson, Genencor International (États-Unis); *cuir*, Dr M. Griffiths, Mike Griffiths Associates (Royaume-Uni); *transformation des aliments*, Dr K. Kraus, Fermentation Marketing (États-Unis); *métaux et minéraux*, Dr C. Brierley, Brierley Consultancy LLC (États-Unis) et Professeur P.R. Norris, University of Warwick (Royaume-Uni) pour l'extraction minière par voie biologique et la biolixiviation; *énergie*, Dr M. Grossman et Dr E. Stiefel, Exxon Res. and Eng. Co. (États-Unis) et Dr D. Monticello, Energy BioSystems Corporation (États-Unis); *aliments pour animaux*, Dr A. Morgan, Finnfeeds International Ltd. (Royaume-Uni), Professeur Dr W. Leuchtenberger, Degussa AG (Allemagne), Dr M. Eggersdorfer, BASF (Allemagne) et Dr H.P. Meyer, LONZA (Suisse). Les données économiques et statistiques ont été examinées par un groupe d'experts en biotechnologie aux Pays-Bas issus : de l'industrie (Dr A. Bruggink, Chemferm; Dr C. Buisman, Paques Bio Systems; Dr Ing. A. Hooijmeijer, TNO Paper Production Technology; Dr A. Luiken, TNO Industrie; Dr M. van Oort, NOVO; Dr M. van Vliet, British Leather Confederation; Dr M. Warmerdam, Gist-brocades); des pouvoirs publics (Ir M. Butter, ministère du Logement, de l'Aménagement du territoire et de l'Environnement; Ir G. Mulderink, DCO); et des universités (Dr J. Cramer, Eindhoven; Dr W. Harder, TNO; Dr L. Reijnders, Amsterdam; Dr W.H. Rulkens, Wageningen).

Encadré 2.1. **Biotechnologie et émissions de CO₂**

Les hydrocarbures fossiles fournissent la matière première principale pour la production d'énergie et de substances chimiques, mais le produit de leur oxydation, le CO₂, est un gaz à effet de serre puissant. Tous les moyens de réduire la consommation de carbone fossile, à travers l'amélioration du rendement énergétique ou l'utilisation de ressources de remplacement, diminueront directement la production de CO₂ et réduiront par conséquent le réchauffement de la planète.

Procédés industriels

L'utilisation de la biotechnologie a déjà abaissé la consommation d'énergie de procédés industriels. Ces réductions ne peuvent être chiffrées que dans quelques cas, qui seront exposés dans le présent rapport. Dans d'autres, on ne possède que des informations fragmentaires. Les données dont on dispose jusqu'à présent ne permettent pas d'extrapoler les chiffres à l'ensemble des secteurs industriels.

L'acrylate d'ammonium, un intermédiaire essentiel de la fabrication des polymères acryliques, résulte de l'hydrolyse de l'acrylonitrile en acide acrylique et de la réaction de celui-ci avec l'ammoniac. Cette réaction consomme beaucoup d'énergie et engendre des sous-produits difficiles à extraire. Un procédé utilisant une enzyme bactérienne qui synthétise directement un acrylate d'ammonium de la même qualité en consommant moins d'énergie est exploité à grande échelle depuis plusieurs années.

Dans la fabrication du papier, le traitement des fibres de cellulose de la pâte par deux enzymes, la cellulase et l'hémicellulase, accélère l'égouttage de l'eau présente dans la pâte humide, ce qui réduit la durée de l'opération et diminue la quantité d'énergie requise par le séchage. Des essais ont démontré que la vitesse de la machine pouvait subir un accroissement allant jusqu'à 7 pour cent et la consommation d'énergie une diminution allant jusqu'à 7.5 pour cent. Le remplacement de la mise en pâte thermomécanique par le biopulpage a procuré une réduction de la consommation d'énergie électrique pouvant atteindre 30 pour cent.

Matières

Au cours de sa croissance, la biomasse consomme du CO₂. Les substances fabriquées à partir de ce type de matières premières renouvelables apportent donc une contribution nette nulle aux émissions de gaz à effet de serre dans l'atmosphère, à moins que leur fabrication consomme des combustibles fossiles. Une gamme étendue de produits chimiques et de matériaux de structure peuvent être obtenus à partir de matières premières biologiques, notamment des plastiques biodégradables, des biopolymères et des biopesticides, des fibres nouvelles et des bois d'œuvre. Les amides, esters et acétates d'origine végétale sont employés à l'heure actuelle comme plastifiants, agents d'adhérence ou de glissement et agents de démoulage pour les polymères synthétiques. Les propriétés des hydrocarbures d'origine biologique liés à des amines, des alcools, des phosphates et des coordinats soufrés sont exploitées dans les assouplissants textiles, les inhibiteurs de corrosion, les véhicules d'encre, les solvants, les produits capillaires et les parfums.

Carburants propres

Si la biomasse peut être consommée (incinérée) directement pour produire de l'énergie, elle peut aussi être convertie en un vaste éventail de produits chimiques et de combustibles liquides. Si la production annuelle de biomasse terrestre représente, du point de vue énergétique, environ le quintuple de la consommation d'énergie de la planète, la biomasse fournit seulement 1 pour cent de l'énergie commerciale. L'énergie issue de la biomasse n'est pas en mesure de concurrencer les combustibles fossiles aux prix actuels et n'a jusqu'à présent pénétré le marché que là où les pouvoirs publics ont subventionné son utilisation.

Le bio-éthanol est un carburant liquide de substitution, ne contribuant pas à la formation de CO₂. A mesure que de nouvelles technologies, notamment la fermentation continue et la production à partir de déchets lignocellulosiques (bois et cultures agricoles), et des techniques de séparation plus efficaces sont mises au point, le coût du bio-éthanol concurrencera celui de l'essence. Sur une période de 20 ans, la production d'éthanol aux États-Unis, réalisée uniquement à partir de déchets lignocellulosiques, pourrait atteindre 470 millions de tonnes par an, ce qui équivaut à la consommation actuelle d'essence, du point de vue énergétique.

grande échelle de la nouvelle biotechnologie. Les produits de départ renouvelables, naguère supplantés par les matières premières issues des combustibles fossiles, effectuent un retour, en partie parce qu'ils sont quelquefois plus accessibles par voie biotechnologique. Les nouveaux produits issus de la biotechnologie industrielle sont plus performants; les transformations chimiques plus complexes autorisées par la biocatalyse permettent d'obtenir des produits plus «intelligents» à un prix à peine plus élevé pour le consommateur.

Ce chapitre examine les applications présentes de la biotechnologie dans les secteurs suivants : produits chimiques (en particulier la chimie fine et les produits pharmaceutiques); pâtes et papiers; textiles et cuir; transformation des aliments (y compris les aliments pour animaux); métaux et minéraux; et énergie. Ces secteurs ont été choisis parce qu'ils abritent bon nombre, sinon la plupart, des activités de fabrication les plus polluantes. Ce chapitre envisage une technologie telle qu'elle est appliquée si elle a atteint ou dépassé le stade pilote de son développement. Il évalue également la contribution économique de la biotechnologie aux procédés industriels plus propres dans ces secteurs.

Encadré 2.2. **Ventes associées à la biotechnologie (VAB)**

Dans le présent rapport, l'expression «ventes associées à la biotechnologie» (VAB) est utilisée comme indicateur de la pénétration sur le marché. Ce qu'elle recouvre est défini au premier chapitre. Les chiffres de vente des produits issus de la biotechnologie, qui sont souvent utilisés dans les études économiques, ne tiennent pas compte des retombées économiques de ces produits lorsqu'ils entrent dans la fabrication d'autres produits. Cela s'applique particulièrement au cas de la biotechnologie intégrée au procédé. C'est pourquoi le facteur de conversion compris entre 6 et 9 proposé par la *European Association for Bioindustries* (Ballantine et Thomas, 1997) sera utilisé dans l'estimation de la part de marché totale de la biotechnologie pour chaque secteur manufacturier sélectionné à l'échelle mondiale. Cette procédure permet d'estimer les effets cumulatifs ou de ricochet le long de la filière de production dans chaque secteur.

PRODUITS CHIMIQUES

La catégorie «produits chimiques» recouvre la fabrication des produits chimiques de base, des produits pharmaceutiques, des enzymes, des produits dérivés du pétrole et du charbon, des spécialités chimiques, des produits de chimie fine et des plastiques. Ce secteur engendre beaucoup de matières, consomme une grande quantité d'énergie et de ressources non renouvelables et produit une part importante des déchets solides, liquides et gazeux. Aux États-Unis, par exemple, la part de ce secteur dans l'ensemble des industries manufacturières (d'après le volume des ventes) est demeurée proche de 18 pour cent durant les 20 dernières années (OCDE, 1996).

Comme la biotechnologie a ouvert de nouvelles voies de fabrication de substances chimiques, susceptibles d'être moins polluantes que les méthodes en vigueur, divers secteurs de l'industrie chimique ont commencé à essayer les nouveaux instruments. Du point de vue de l'impact sur l'environnement, la possibilité d'utiliser des ressources d'origine biologique comme produit de départ dans les secteurs de l'industrie chimique qui brassent de gros volumes présente un intérêt particulier. Bien qu'il ne soit pas certain que la fabrication fondée sur des procédés biologiques soit moins polluante que les méthodes actuelles lorsque toutes les contraintes exercées sur l'environnement auront été prises en considération (voir aussi le premier chapitre), on ne risquera pas de se tromper en affirmant que les déchets des procédés de fabrication biologiques seront plus compatibles avec les systèmes classiques de traitement des eaux résiduaires.

La lenteur de la pénétration de la biotechnologie dans l'industrie chimique laisse supposer que l'avantage économique global des procédés biotechnologiques sur les méthodes existantes n'est pas énorme à l'heure actuelle. Les avantages écologiques de la biotechnologie n'ont pas suffi à eux seuls à entraîner le remplacement rapide des procédés chimiques par la biotechnologie sur ce marché. La pénétration se poursuit lentement, toutefois, et la tendance est nettement à l'adoption d'instruments biotechnologiques en combinaison avec des outils chimiques traditionnels, en vue d'obtenir de nouveaux procédés compétitifs sur le plan économique.

La biotechnologie entre pour une part appréciable dans la fabrication des produits de chimie fine et des produits pharmaceutiques, qui composent environ 1 pour cent du volume des produits. À l'échelle mondiale, la biotechnologie contribuant à la production plus propre représente quelque 60 pour cent de la valeur totale des VAB pour les produits de chimie fine et de 5 à 11 pour cent s'agissant des produits pharmaceutiques. Aux États-Unis, sa contribution au secteur pharmaceutique paraît même supérieure, comprise entre 9 et 21 pour cent. La biotechnologie est de plus en plus exploitée dans la fabrication des produits chimiques de base (éthanol, acrylamide, acides organiques) et des composés chiraux. Des procédés pilotes ont été mis au point pour la production d'autres substances, comme le propane-1.3-diol.

L'éco-efficience de l'industrie chimique s'est améliorée avec le recours à la biocatalyse, le recyclage des solvants et le traitement (biologique) des eaux résiduaires. La contribution de la biocatalyse à la production plus propre se chiffre à quelque 60 pour cent. Dans les années 80, l'introduction de la biocatalyse dans la fabrication des produits de chimie fine a entraîné une réduction substantielle de la production de déchets. Comme l'indique le tableau 2.1, bien que le volume de production ait augmenté d'un facteur quatre, la production de déchets a reculé de 20 pour cent grâce à la biocatalyse.

Tableau 2.1. **Croissance et efficacité de l'industrie chimique entre 1975 et 1995**

| | Accroissement du volume de production (millions de tonnes) | Diminution de la production de déchets (tonne/tonne) | Diminution du volume de déchets (millions de tonnes) |
|----------------------------|--|--|--|
| Produits chimiques de base | | | |
| - pétrochimie | 100 → 250 | 0.1 → 0.01 | 10 → 2.5 |
| - chimie lourde | 10 → 25 | 1 → 0.1 | 10 → 2.5 |
| Chimie fine | 0.5 → 2 | 10 → 2 | 5 → 4 |
| Spécialités chimiques | 0.1 → 0.5 | 50 → 10 | 5 → 5 |
| Total (indicatif) | 100 → 300 | | 30 → 15 |
| Production + déchets | 130 → 315 | | 315 |
| Production/déchets | 100/30 | | 100/5 |

Source : Bruggink, Chemferm, Pays-Bas (communication personnelle).

Produits chimiques de base

Cela fait approximativement dix ans que la Nitto Chemical Company de Tokyo est passée d'un procédé chimique traditionnel à un procédé biotechnologique pour la production d'acrylamide destinée à la polymérisation. Si les avantages qui en ont résulté pour l'environnement ont été abondamment commentés, il existe encore relativement peu d'exemples de productions chimiques industrielles par voie biotechnologique. On a toutefois correctement démontré que les procédés biotechnologiques pouvaient être développés à plus grande échelle jusqu'au niveau souhaité pour la fabrication de produits chimiques de base.

Un « Livre blanc », publié récemment par le Laboratoire national de l'énergie renouvelable (*National Renewable Energy Laboratory* – NREL) du ministère de l'Énergie des États-Unis sous le titre « Ressources renouvelables d'origine biologique 2020, perspectives d'avenir : optimiser l'utilisation d'une des ressources naturelles les plus importantes de notre nation », est particulièrement instructif à cet égard. L'encadré 2.3 reproduit des extraits de ce document. On remarquera que sur les sept raisons invoquées pour justifier le recours aux ressources d'origine biologique, une seule est d'ordre écologique.

Encadré 2.3. Pourquoi utiliser des produits renouvelables d'origine biologique ?

L'utilisation de produits renouvelables d'origine biologique comme produits de départ de l'industrie chimique s'appuie sur plusieurs avantages substantiels.

Les produits de départ d'origine biologique représentent désormais une ressource renouvelable majeure. Le ministère de l'Agriculture des États-Unis estime qu'environ 50 millions d'hectares pourraient être affectés aux cultures énergétiques à partir du siècle prochain. Le taux annuel de renouvellement de la biomasse a servi de base à plusieurs projections selon lesquelles la biomasse pourrait pourvoir à presque tous les besoins intérieurs des États-Unis en matière de chimie organique.

Les ressources renouvelables et d'origine biologique représentent un compartiment sous-exploité de l'économie de la nation et pourraient être produites en quantités suffisantes pour approvisionner une large part des besoins intérieurs de produits chimiques et d'énergie, sans porter préjudice aux débouchés traditionnels, tout en diversifiant l'industrie et en favorisant le développement économique rural.

Les produits renouvelables d'origine biologique peuvent contribuer à accroître l'indépendance économique des États-Unis. Une production chimique reposant sur un pourcentage appréciable de matières renouvelables contribue à la sécurité, parce que les produits de départ sont d'origine nationale, ce qui diminue la dépendance à l'égard des « points chauds » de la planète. Les événements survenus entre l'Irak et les États-Unis en 1996 et la réaction immédiate des marchés pétroliers à terme illustrent de façon parlante les risques associés à la dépendance à l'égard du pétrole brut provenant de régions politiquement instables.

L'utilisation accrue de la biomasse prolongera la durée de vie des réserves de pétrole brut disponibles. Dans un scénario de croissance soutenue, le groupe Royal Dutch/Shell prévoit que le marché de la biomasse se chiffrera à 150 milliards de dollars par an durant la première moitié du XXI^e siècle, et estime que 30 pour cent des besoins mondiaux de produits chimiques et de combustibles pourront être satisfaits par des ressources renouvelables au cours de la même période.

Le recours à la biomasse est régulièrement proposé comme moyen efficace de freiner l'accumulation de gaz à effet de serre.

La biomasse offre une souplesse certaine. La diversité de ses éléments constitutifs procure autant de possibilités de fabriquer des substances chimiques que les sources non renouvelables. Les fournisseurs de produits de départ renouvelables reculent moins devant le risque lié à la production de substances chimiques non traditionnelles.

Du point de vue économique, la fabrication de produits de départ d'origine biologique est souvent comparable à celle de produits de départ classiques et quelquefois supérieure.

Source : Dr Gene Peterson et Dr Joe Bozell, National Renewable Energy Laboratory (Laboratoire national de l'énergie renouvelable), ministère de l'Énergie des États-Unis (communication personnelle).

Que la fabrication de produits chimiques de base à partir de produits de départ d'origine biologique soit ou non efficace par rapport à son coût, les produits d'alimentation issus du pétrole se prêtent au traitement par des procédés biotechnologiques propres (voir encadré 2.4). Les hydrocarbures sont susceptibles d'être métabolisés par de nombreux organismes et les produits de l'oxydation métabolique partielle de ces composés, notamment les alcools, les acides et les époxydes, peuvent être obtenus par voie biologique à partir de dérivés du pétrole.

A l'heure actuelle, les produits chimiques de base dont l'origine est principalement végétale aux États-Unis comprennent l'éthanol (3.8 millions de tonnes/an), les esters et les éthers de cellulose (0.5 million de tonnes/an), le sorbitol (0.19 million de tonnes/an) et l'acide citrique (0.16 million de tonnes/an). Ce secteur combine actuellement des procédés biotechnologiques et chimiques qui représentent l'avant-garde de l'impact de la biotechnologie sur les produits chimiques de base.

La fabrication de produits chimiques de base tels que l'acide succinique et l'éthylène glycol, qui proviennent encore presque exclusivement de produits d'alimentation pétrochimiques, en utilisant de nouveaux procédés et des ressources renouvelables en est au stade pilote, dans le cadre de programmes appuyés par les pouvoirs publics en partenariat avec le secteur privé (voir encadré 2.5).

Encadré 2.4. Substances chimiques fabriquées à partir de produits de départ biologiques

Il n'est plus nécessaire de partir du pétrole pour fabriquer des produits chimiques. Le maïs, la betterave, le riz et même la pomme de terre fournissent d'excellents produits de départ. La transformation des sucres en alcool par les micro-organismes est connue depuis très longtemps. Mais il aura fallu attendre l'arrivée du génie génétique pour pouvoir imaginer des moyens de maîtriser la complexité des systèmes biologiques, en vue de créer des molécules qui sont difficiles à synthétiser par voie chimique traditionnelle.

Par exemple, un polymère, le téréphtalate de polytriméthylène (3GT), possède des propriétés améliorées par rapport au polyester traditionnel (2GT). La commercialisation a cependant tardé, en raison du prix élevé de la fabrication du triméthylèneglycol (3G), l'un des monomères du 3GT.

Le secret de la fabrication du 3G réside dans le mécanisme cellulaire de certains micro-organismes non apparentés. Certaines levures que l'on trouve dans la nature convertissent le sucre en glycérol, tandis que quelques bactéries peuvent transformer le glycérol en 3G. On ne connaît malheureusement aucun organisme naturel capable d'effectuer les deux.

Une équipe mixte de scientifiques de DuPont et de Genencor International a créé, en utilisant la technologie de l'ADN recombiné, un micro-organisme possédant toutes les enzymes nécessaires pour convertir le sucre en 3G. Cette avancée notable ouvre la voie à la production du 3G à grande échelle, à faible coût et sans danger pour l'environnement. Le coût final du 3G par ce procédé devrait avoisiner celui de l'éthylèneglycol (2G).

Le processus de formation du 3G par fermentation ne requiert ni métaux lourds, ni pétrole, ni substances chimiques toxiques. La matière première est d'origine agricole : le glucose de l'amidon de maïs. Non seulement ce processus ne libère pas de CO₂ dans l'atmosphère, mais il le fixe parce que le maïs absorbe du CO₂ au cours de sa croissance. La biodégradation de tous les effluents liquides est facile et sans risques. De surcroît, le 3GT se prête facilement à la méthanolyse, qui dépolymérise les polyesters en restituant leurs monomères originaux. Les polyesters usagés peuvent ainsi être repolymérisés et recyclés indéfiniment.

Source : Annonce publiée par la société DuPont dans le journal *Scientific American*, mai 1997, p. 22.

Produits de chimie fine

La chimie fine est l'un des secteurs industriels où l'impact de la biotechnologie (biocatalyse) est le plus marquant (Bruggink, 1996 ; Sheldon, 1997), en raison de :

- la nécessité de remplacer les procédés stoechiométriques traditionnels afin d'améliorer le rapport produit/déchets ;
- l'impossibilité de transférer les procédés chimiocatalytiques de la pétrochimie à la chimie fine ;
- la bonne acceptation des enzymes par les chimistes organiciens ;
- le bas niveau des obstacles à la pénétration des nouvelles technologies dans cette industrie à petite échelle, autrement dit la faiblesse des investissements nécessaires ;
- le degré élevé de spécificité (y compris la stéréospécificité) et de sélectivité des biocatalyseurs.

Si la biocatalyse est la source de 60 pour cent de la production moins polluante dans le secteur de la chimie fine (encadré 2.6), la réutilisation et la réduction des solvants utilisés ont aussi contribué à rendre les procédés de production plus respectueux de l'environnement. Comme il s'agit d'une industrie à petite échelle, la réduction absolue pour chaque procédé de production n'est pas énorme.

Le tableau 2.2 énumère quelques produits fabriqués actuellement selon des méthodes biotechnologiques. Il ressort de ce tableau que la biotechnologie est largement appliquée dans les secteurs de la chimie fine et des produits pharmaceutiques. Les vitamines sont encore produites dans leur majorité par la chimie organique, qui demeure la méthode préférée.

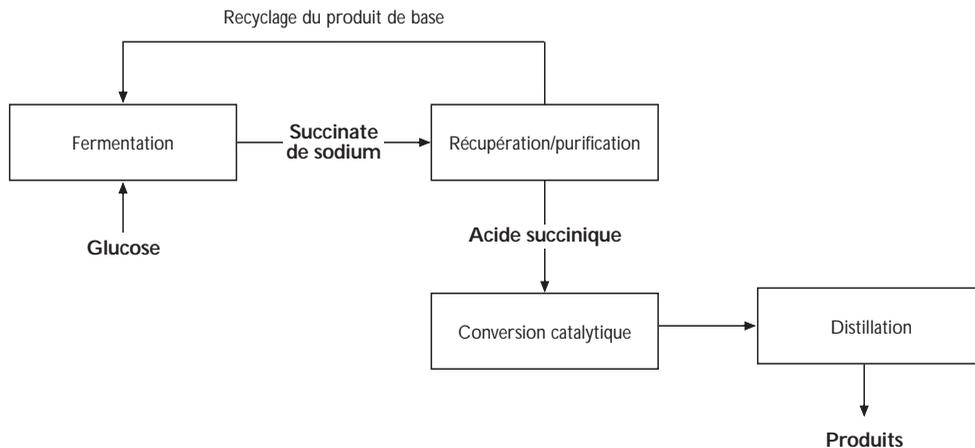
Encadré 2.5. Produits de départ de l'industrie chimique issus de ressources renouvelables

Quatre laboratoires du ministère de l'Énergie des États-Unis, dont l'Oak Ridge National Laboratory, ont conclu un accord de 7 millions de dollars avec Applied CarboChemicals en vue de fabriquer des produits de départ pour l'industrie chimique issus de cultures agricoles renouvelables, à un coût nettement inférieur à celui des méthodes pétrochimiques traditionnelles tout en éliminant le gypse, sous-produit indésirable qui doit être mis en décharge.

Dans ce nouveau procédé, l'acide succinique est obtenu par la fermentation du glucose du maïs, suivie par la séparation et la purification de l'acide, qui est ensuite utilisé comme intermédiaire de la fabrication du butane-1,4-diol, du tétrahydrofurane, de la N-méthylpyrrolidone et d'autres produits de départ utilisés pour fabriquer un grand assortiment de substances chimiques. Les marchés intérieurs existants pour ces produits chimiques totalisent presque 0.45 million de tonnes par an, soit plus de 1.3 milliard de dollars.

Les avantages économiques potentiels de ce projet et d'autres de l'Alternative Feedstock Program comprennent l'expansion des marchés pour le maïs et d'autres produits de départ renouvelables, une plus grande sécurité de l'emploi, voire une croissance de l'emploi en agriculture et dans les industries connexes. Il pourrait aussi entraîner des économies d'énergie substantielles, étant donné qu'une usine produisant des composés chimiques en combinant des procédés chimiques et biologiques procurerait une économie d'énergie équivalente à celle nécessaire pour chauffer 80 000 foyers pendant un an, et préserverait des ressources pétrolières précieuses.

Conception du procédé de production de composés chimiques



Source : Brian Davison, Oak Ridge National Laboratory.

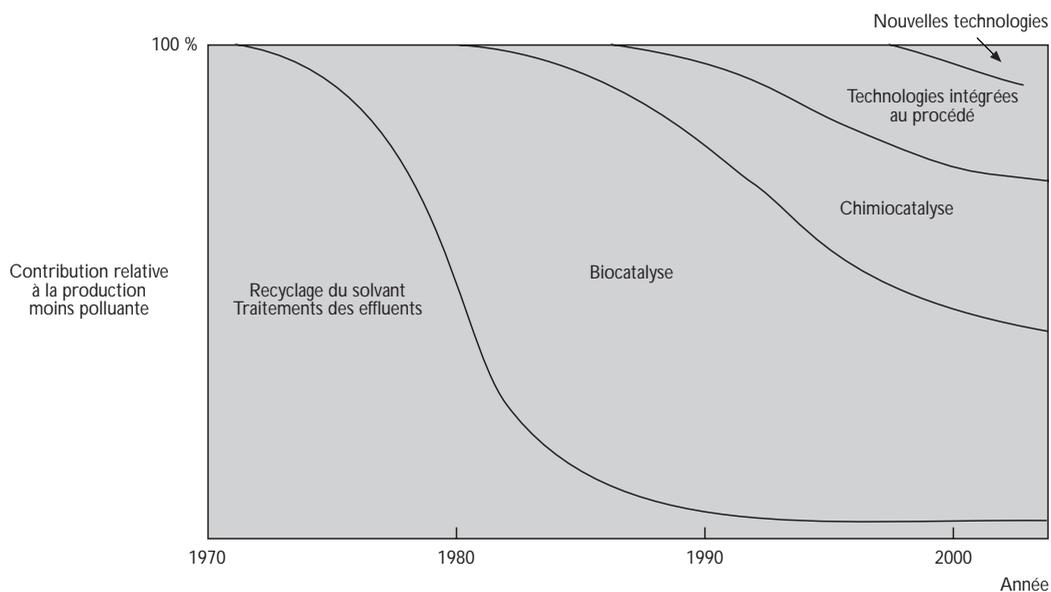
Enzymes

Les enzymes forment une subdivision particulière de la chimie fine et représentent un marché important (tableau 2.3). Elles sont utilisées dans tous les secteurs manufacturiers et participent la plupart du temps à la production propre ou à l'atténuation des pressions sur l'environnement. Les enzymes ajoutées aux produits lessiviels pour s'attaquer aux protéines, qui constituent d'ailleurs la part du lion dans les ventes d'enzymes, se rattachent à cette deuxième catégorie. La présence d'enzymes dans les détergents est bénéfique à l'environnement puisqu'elle abaisse la quantité de phosphates libérés dans l'environnement et la consommation d'énergie durant le lavage.

Encadré 2.6. Fabrication propre de produits de chimie fine

Pour simplifier, un procédé de fabrication peut être divisé en trois étapes : la production de matières premières, la conversion, et la transformation en aval. Aujourd'hui, la biotechnologie joue un rôle dans la conversion, par le biais de la fermentation et des réacteurs à enzymes (immobilisées). A l'avenir, elle pourrait intervenir dans la production de matières premières, en fournissant des substances chimiques de base à partir de biomatériaux, et dans le secteur de la production primaire agricole. La biosynthèse et les procédés de fermentation, les réacteurs enzymatiques spécifiques et la reconnaissance moléculaire sélective par la biotechnologie seront également, à l'avenir, appliqués à plus grande échelle dans les transformations en aval. A l'étape de la conversion, les chiffres indiquent cependant que la biocatalyse sera concurrencée par la chimiocatalyse, les technologies intégrées au procédé et les nouvelles technologies.

Prévision de l'influence relative de différentes technologies moins polluantes dans le secteur de la chimie fine



Source : Bruggink, 1997 (communication personnelle).

En 1996, les ventes d'enzymes pour détergents ont représenté 300 à 550 millions de dollars dans le monde, tandis que le marché total des enzymes serait compris entre 624 millions et 1.6 milliard de dollars (BUNR, 1996; Novo Nordisk, 1997). Néanmoins, toutes les sources indiquent que les enzymes employées dans les détergents forment le gros des ventes d'enzymes. Environ 80 pour cent de la demande mondiale d'enzymes pour détergents provient d'Europe et des États-Unis. Des estimations prudentes de la totalité des VAB dans le domaine de la chimie fine peuvent être déduites des chiffres de vente des enzymes pour détergents (tableau 2.4). Les estimations de la contribution totale de la biotechnologie à la production plus propre dans le secteur chimique au Japon oscillent entre un et deux milliards de dollars (Ballantine et Thomas, 1997).

Tableau 2.2. **Volumes de produits et de production revenant à la biotechnologie dans le secteur de la chimie fine**

Tonnes par an

| | |
|---|---------|
| Acide 6-aminopénicillanique | 7 000 |
| Acide 7-aminocéphalosporinique | 1 000 |
| Aspartame | 600 |
| L-lysine | 280 000 |
| L-thréonine | 10 000 |
| L-méthionine | 200 |
| Vitamine B12 | 12 |
| Vitamine C | 70 000 |
| Provitamine D2 | 5 |
| Vitamine F | 1 000 |
| Nicotinamide | 3 000 |
| D- <i>p</i> -hydroxyphénylglycine | 3 000 |
| Enzymes pour l'alimentation animale | 20 000 |
| Enzymes pour la transformation des aliments | 100 000 |

Source : BUNR, 1996 ; Jihei Yoda, Association des bio-industries japonaises, communication personnelle, août 1997.

Tableau 2.3. **Volume des ventes d'enzymes dans différents secteurs**

Millions de dollars

| | |
|--------------------------------------|-----|
| Détergents | 300 |
| Aliments pour l'homme et les animaux | 246 |
| Papiers | 8 |
| Textiles et cuir | 70 |
| Total | 624 |

Source : BUNR, 1996.

Tableau 2.4. **Estimation de la part de marché annuelle de la biotechnologie (VAB) dans l'industrie chimique**

Milliards de dollars

| Secteur | Europe ¹ | États-Unis | Japon | Monde |
|--|---------------------|------------|-------|-------|
| Valeur marchande totale des produits chimiques | 763 ² | 511 | 452 | 1 726 |
| Ventes associées à la biotechnologie (VAB) | 1-2 ³ | 1-23 | 2 | 4-6 |
| Biotechnologie pour une production plus propre | 1-2 ³ | 1-23 | 1-2 | 3-6 |
| Biotechnologie pour une production plus propre (%) | 1 % ⁴ | 1 % | 1 % | 1 % |

1. Les estimations pour l'Europe sont fondées sur la valeur marchande en France, en Allemagne, en Italie et au Royaume-Uni.

2. A l'exclusion des traitements et des médicaments.

3. Estimations fondées sur les ventes d'enzymes pour détergents.

4. Valeur de la contribution de la biotechnologie aux procédés propres ajoutée à sa contribution au secteur de la chimie fine.

Source : Smith, 1996 ; Bickerstaff, 1995 ; Ballantine et Thomas, 1997 ; Abbott, 1996 ; Bijman, 1995 ; OCDE, 1996.

Produits à usage médical (produits pharmaceutiques, vaccins, produits de diagnostic)

De nos jours, de nombreux produits pharmaceutiques sont composés de molécules semi-synthétiques, c'est-à-dire de molécules dont une partie de la structure est synthétisée par un organisme vivant, avant d'être modifiée par un traitement chimique. La conception récente d'enzymes thermostabilisées et la mise au point d'un nouveau système de bioréacteur par Kaneka Corporation ont permis de produire 2 000 tonnes/an d'une chaîne latérale entrant dans la fabrication de l'amoxicilline. Ce système, entièrement enzymatique, a remplacé un procédé plus ancien dans lequel une partie

de la synthèse s'effectuait par voie chimique. L'étape chimique du procédé comportait quelques inconvénients, notamment la coloration du produit, la formation de sous-produits et le mauvais rendement énergétique. Ce n'est là qu'un exemple de l'application de la biotechnologie à l'amélioration de la chimie d'un procédé dans l'industrie pharmaceutique.

D'après des études de marché conduites en Europe et aux États-Unis, quelque 70 pour cent des entreprises biotechnologiques opèrent dans le secteur pharmaceutique (Congrès des États-Unis, OTA, 1991; Ballantine et Thomas, 1997; Abbott, 1996; Smith, 1996; Degenars et Janszen, 1996; Novo Nordisk, 1997). Dans l'industrie pharmaceutique, la biotechnologie est davantage appliquée à la découverte de produits qu'à la fabrication. Toutefois, de nombreux produits issus de la biotechnologie, tels que des anticorps de diagnostic et des sondes géniques, ne peuvent être obtenus que par voie biotechnologique. Par définition, ils ne peuvent être classés comme propres ou plus propres, étant donné qu'ils engendrent des effluents et qu'ils ne remplacent ni n'améliorent une technologie existante. Le volume du produit est généralement très petit.

Il semble toutefois que les procédés biotechnologiques propres jouent un rôle appréciable dans le secteur de la santé, notamment dans la production plus sûre de vaccins nouveaux et plus efficaces (hépatite, coqueluche, par exemple). Du point de vue quantitatif, les antibiotiques représentent la part la plus importante du marché (les ventes mondiales de pénicilline ont dépassé le milliard de dollars en 1996). Ils sont produits à l'aide d'une combinaison de procédés biotechnologiques et chimiques (Achilladelis, 1993).

Les progrès récents de la biotechnologie concourent à la production plus propre d'antibiotiques semi-synthétiques par biocatalyse, à la fermentation optimisée et au remplacement des solvants organiques par de l'eau. Par exemple, en remplaçant une réaction chimique conduite dans du chlorure de méthylène par une étape enzymatique en milieu aqueux, la consommation totale du chlorure de méthylène a été diminuée de quelque 25 000 tonnes. La biotechnologie moins polluante intégrée au procédé est donc tout aussi importante pour le secteur de la santé que pour les autres secteurs.

En 1993, la totalité du marché des médicaments en Europe s'est chiffrée à 80 milliards de dollars. La biotechnologie est largement présente sur ce créneau : son impact indirect total sur le marché était compris entre 7 et 8 milliards de dollars en 1996 (Ballantine et Thomas, 1997). La part de marché de la biotechnologie dans la production moins polluante du secteur de la santé atteint ainsi 4 à 6 milliards de dollars (tableau 2.5). Aux États-Unis, les ventes directes de médicaments issus de la biotechnologie sont passées de 6 milliards de dollars en 1994 à 10 milliards de dollars en 1995 (Bijman, 1995; Abbott, 1996). La totalité des VAB dans l'industrie pharmaceutique et la proportion de biotechnologie appliquée à la production plus propre sont estimées dans le tableau 2.5.

Tableau 2.5. **Part de marché estimée de la biotechnologie (VAB) dans le secteur pharmaceutique (médicaments)**

| Milliards de dollars | | | | |
|--|-----------------|------------|-------|--------|
| Secteur | Europe | États-Unis | Japon | Monde |
| Valeur marchande totale des médicaments | 80 ¹ | 68 | 59 | 207 |
| Ventes associées à la biotechnologie (VAB) | 7-8 | 11-18 | 3 | 21-29 |
| Biotechnologie pour une production plus propre | 4-6 | 6-14 | 1-2 | 11-22 |
| Biotechnologie pour une production plus propre (%) | 5-8 % | 9-21 % | < 1 % | 5-11 % |

1. Les estimations concernant l'Europe sont fondées sur la valeur marchande en France, en Allemagne, en Italie et au Royaume-Uni.
Source : Smith, 1996; Ballantine et Thomas, 1997; Abbott, 1996; Bijman, 1995; OCDE, 1996; Godfrey et West, 1996.

Produits chimiques phytosanitaires

La biotechnologie a permis la fabrication de produits chimiques phytosanitaires connus, tels que le glyphosate, ainsi que de précurseurs ou produits chiraux. La société DuPont a annoncé qu'elle avait

mis au point un nouveau procédé pour fabriquer cet herbicide à large spectre très utilisé, procédé qui fait appel à des enzymes clonées à partir de l'épinard et de la levure pour former un catalyseur capable d'oxyder l'acide glycolique en acide glycoxylique, ce qui diminue considérablement le nombre d'étapes de l'ensemble du procédé, tout en réduisant aussi les déperditions de produits dans les flux de déchets.

De par sa grande analogie avec la découverte de médicaments, la recherche de nouveaux produits chimiques phytosanitaires peut bénéficier très directement de la biotechnologie moderne. La découverte de nouveaux produits phytosanitaires passait traditionnellement par l'application d'échantillons de nouveaux composés sur des plantes d'essai; il fallait pour ce faire tester des dizaines de milliers de composés afin de trouver un nouveau produit commercialisable, autrement dit recourir à des méthodes de tri qui traitent de grandes quantités. Les essais biotechnologiques à très petite échelle, qui économisent du temps et de l'argent, sont actuellement expérimentés par presque toutes les grandes sociétés agrochimiques.

Les produits phytosanitaires d'origine purement biotechnologique, tels que les plantes transgéniques fabriquant la toxine de Bt, arrivent sur le marché. La toxine de Bt est une protéine produite par des bactéries qui sont des agents pathogènes naturels des insectes. La toxicité de cette protéine est très spécifique de l'espèce d'insecte cible et par conséquent d'un emploi sûr. La première génération de produits biotechnologiques utilisant la toxine de Bt consistait en de simples préparations de bactéries et de leurs spores, contenant la toxine, qui pouvaient être appliquées sur les plantes et ingérées par les insectes. Les produits actuels ont été mis au point en clonant les gènes codant pour la toxine issus de la bactérie dans la plante à cultiver, de façon à conférer à la plante la capacité de produire la toxine. Ces nouveaux progrès répondent au moins en partie aux préoccupations d'environnement suscitées par l'application de tonnes de produits chimiques sur les champs pour lutter contre les organismes nuisibles. La première année d'expérience de Monsanto avec le coton transgénique résistant à l'anthronome semble confirmer la promesse d'une réduction de la consommation de substances chimiques grâce au génie génétique. Des exemples d'autres avancées biotechnologiques répondant aux besoins de la chimie des procédés sont fournis à l'annexe 2.1.

PÂTES ET PAPIERS

L'industrie des pâtes et papiers occupe une part importante et croissante dans l'économie mondiale. La production mondiale de pâtes et papiers a augmenté, parallèlement à la consommation de papier. En général, cette industrie à très forte intensité de capital enregistre de faibles marges bénéficiaires. Pour faire face à la demande croissante de pâtes et papiers et se conformer aux réglementations environnementales de plus en plus strictes, l'industrie recherche sans cesse des améliorations technologiques (l'annexe 2.2 présente les aspects techniques de la mise en pâte plus en détail).

La taille actuelle du marché ne représente probablement que 1 à 2 pour cent des ventes totales d'enzymes (BUNR, 1996; Godfrey et West, 1996). Mais, sous la forte pression du marché et de la demande, pour des raisons d'environnement, de produits et de sous-produits moins chlorés, l'industrie des pâtes et papiers est citée comme offrant les débouchés qui se développent le plus rapidement pour les enzymes industrielles. Aux États-Unis, ils devraient s'accroître de 15 pour cent par an pendant les dix prochaines années. Si on s'en tient à des estimations prudentes, le marché des enzymes aurait représenté 14 millions de dollars aux États-Unis et 11 millions de dollars en Europe en 1994. Le tableau 2.6 indique les contributions de la biotechnologie à la production propre de papier et de pâte.

Divers procédés sont utilisés pour séparer les fibres de cellulose de la lignine du bois et former une pâte (épaisse) qui est ensuite transformée en papier et en carton. Les opérations chimiques existantes de mise en pâte sont particulièrement polluantes. Moins polluant, le biopulpage est réalisé par des champignons qui s'attaquent aux matières lignocellulosiques en dégradant la lignine. Dans les années 70, Eriksson et ses collaborateurs à l'Institut suédois de recherches sur les pâtes et papiers (STFI) de Stockholm, ont démontré que le traitement fongique préliminaire des matières lignocellulosiques pourrait procurer des économies d'énergie et améliorer la résistance du papier.

Tableau 2.6. **Estimation de la part de marché annuelle (VAB) de la biotechnologie dans l'industrie du papier**
Milliards de dollars

| Secteur | Europe | États-Unis | Japon | Monde |
|--|---------|------------|-------|-------|
| Valeur marchande totale des produits en papiers | 311 | 362 | 227 | 900 |
| Valeur marchande de la biotechnologie pour une production propre | 31-62 | n.d. | n.d. | 31-62 |
| Valeur marchande de la biotechnologie pour une production propre (%) | 10-20 % | n.d. | n.d. | 3-7 % |

n.d. = non disponible.

Source : Hooijmeijer, communication personnelle.

La faisabilité économique du biopulpage a été démontrée à l'échelle pilote ; ce procédé augmente le débit de la papeterie de 30 pour cent ou diminue la demande d'énergie électrique d'au moins 30 pour cent pour un débit inchangé. Une étude économique a été entreprise pour une papeterie thermomécanique qui débiterait 600 tonnes par jour. L'investissement nécessaire pour intégrer la technologie du biopulpage dans une papeterie est estimé à 5 à 7 millions de dollars. L'économie d'énergie électrique de 30 pour cent correspond à une économie de 10 dollars par tonne de pâte, ce qui équivaut à une économie annuelle de 2 millions de dollars, qui, comparée à l'investissement estimé, limite la période d'amortissement à deux ou trois ans.

La résine est un mélange de matières hydrophobes présent dans de nombreuses espèces ligneuses, qui pose plusieurs problèmes au cours de la fabrication des pâtes et papiers. Les méthodes appliquées traditionnellement pour lutter contre ces problèmes comportent le séchage naturel du bois avant la mise en pâte et/ou l'adsorption et la dispersion des particules de résine par des substances chimiques durant la mise en pâte et la confection du papier. Ces traitements sont complétés par l'addition de talc fin, de dispersants et d'autres types de produits chimiques. Cela fait environ une dizaine d'années qu'on met au point des méthodes biotechnologiques, qui sont maintenant appliquées à l'échelle industrielle. A la fin des années 80, des chercheurs japonais ont découvert que le traitement des pâtes mécaniques avec des lipases, qui catalysent l'hydrolyse des triglycérides, diminuait substantiellement les problèmes causés par la résine. Au début des années 90, Sandoz Chemicals Corporation aux États-Unis (devenue entre-temps Clariant Corporation) a lancé un nouveau produit consistant en un inoculum fongique de l'ascomycète *Ophiostoma piliferum*. La résine, y compris les acides toxiques qu'elle comprend, est aussi métabolisée de façon assez efficace par les champignons qui dégradent la lignine au cours du biopulpage, ce qui offre donc un avantage supplémentaire.

La structure et la composition chimique de la surface des fibres de la pâte ont une importance déterminante pour la résistance du papier et d'autres propriétés. Des enzymes qui ont été utilisées pour améliorer les propriétés physiques des fibres pourraient acquérir une valeur commerciale à l'avenir. Les cellulases et les xylanases, par exemple, peuvent améliorer la fibrillation de la pâte et renforcer ainsi la résistance du papier. Elles peuvent atténuer la rugosité des fibres et augmenter la densité et le lissé du papier.

Le débit de la machine à papier dépend en partie de l'intensité d'égouttage du matelas de fibres. L'intensité tend à diminuer pour les fibres recyclées, si bien que le débit de la machine à papier décroît à mesure que la teneur en fibres recyclées augmente. Les cellulases et les hémicellulases peuvent accroître l'intensité d'égouttage des fibres recyclées, et des essais pilotes et en vraie grandeur ont conduit à l'utilisation commerciale de ces enzymes comme auxiliaires d'égouttage. Les enzymes modifiant l'amidon sont quelquefois utilisées pour améliorer la qualité du papier. La modification enzymatique des amidons est moins polluante que leur transformation chimique (oxydation), étant donné qu'elle demande moins d'énergie et génère moins de déchets.

Les encres à base d'huile, comme celles des journaux et magazines, sont traditionnellement dégradées à l'aide de soude caustique, de silicates et de peroxydes. Toutefois, les méthodes de désencrage classiques ne permettent plus d'obtenir une pâte de haute qualité du fait de l'utilisation de plus en plus fréquente de papier couché et de procédés d'impression laser ou xérogaphique faisant appel à de nouveaux types d'encres qui contiennent des polymères synthétiques. Les

installations de recyclage doivent par conséquent faire de plus en plus appel à des systèmes mécaniques qui décomposent les plus grandes particules autres que l'encre afin d'autoriser leur récupération par flottation ou par lavage. Des techniques enzymatiques capables de désencrer tous les types de papier recyclé ont récemment été mises au point et commercialisées.

La majorité de la production mondiale de pâte est réalisée par le procédé kraft. Les pâtes kraft se caractérisent toutefois par leur coloration brune, qui doit être éliminée par blanchiment avant la fabrication du papier destiné à l'impression ou à l'écriture ou d'autres produits dans lesquels l'apparence est importante. Le procédé utilisé traditionnellement est la chloration, mais l'opposition des consommateurs et les réglementations environnementales sur le blanchiment au chlore ont conduit les fabricants de pâte à se tourner vers d'autres substances blanchissantes (le dioxyde de chlore, l'oxygène, l'ozone, le peroxyde), à allonger la durée de la mise en pâte et à apporter d'autres modifications au procédé. Certaines de ces méthodes présentent toutefois des inconvénients, tels qu'un coût plus élevé ou un risque accru de diminution du rendement en pâte et de la résistance, par rapport à la chloration.

Une nouvelle méthode de blanchiment de la pâte de bois a été mise au point au Haifa Technion en Israël et expérimentée avec succès au cours d'un essai à grande échelle dans une papeterie. Ce procédé repose sur une nouvelle enzyme mieux adaptée aux températures et au pH qui caractérisent la transformation de la pâte. Le coût du procédé serait le même que celui des méthodes classiques à forte consommation de chlore. Des études menées en Finlande montrent que les hémicellulases, essentiellement des xylanases, améliorent le blanchiment de la pâte. Ces enzymes sont désormais exploitées à l'échelle commerciale en Scandinavie, au Canada, aux États-Unis et au Chili. Le traitement des pâtes kraft par des xylanases diminue sensiblement la consommation d'auxiliaires chimiques, pratiquement sans altérer le rendement ou la qualité de la pâte. Le bioblanchiment de la pâte au sulfite acide par des xylanases, qui permet de réduire l'emploi d'auxiliaires chimiques jusqu'à 51 pour cent, ouvre également des perspectives. La recherche s'oriente actuellement vers la découverte ou la mise au point d'enzymes plus résistantes au pH et à la température.

Les procédés biotechnologiques anciens les plus répandus concernent le traitement des déchets. Celui-ci repose en grande partie sur la dégradation effectuée par des mélanges de micro-organismes aérobies et anaérobies, essentiellement des bactéries. Les progrès réalisés dans le traitement des eaux usées ont porté davantage sur les aspects technologiques que sur la biologie. La législation en matière d'environnement devenant plus stricte (par exemple les «Cluster Rules» de l'Agence pour la protection de l'environnement des États-Unis), il est vraisemblable que les innovations s'appliqueront autant aux aspects biologiques qu'aux aspects technologiques du traitement des eaux usées. La seule solution envisageable à long terme consisterait à mettre au point des technologies permettant aux papeteries de fonctionner sans rejeter d'effluents.

A l'heure actuelle, c'est en grande partie par un traitement biologique intégré au procédé et appliqué à l'eau industrielle provenant de la même installation que l'on obtient une production plus propre. Quelque 10 à 20 pour cent des fabricants de papier européens réutilisent l'eau traitée de cette manière, si bien que le rejet d'eaux résiduelles est nul (Hooijmeijer, communication personnelle). Aux États-Unis et au Japon, le nombre de fabricants de papier qui recourent à cette pratique est beaucoup plus limité.

Comme l'Europe produit environ 25 pour cent du papier fabriqué dans le monde entier, la pénétration du recyclage intégré de l'eau sur le marché mondial a atteint à présent quelque 5 pour cent. Cette application de la biotechnologie diminue le coût global en abaissant substantiellement le coût du prélèvement d'eau douce et les taxes sur les effluents d'eaux usées. Dans un petit pays comme les Pays-Bas, si le cycle de l'eau utilisée au cours de la fabrication du papier pouvait être complètement fermé, on obtiendrait une économie annuelle de consommation d'eau de l'ordre de 30 millions de mètres cubes et une réduction de la consommation d'énergie de 3 millions de GJ (gigajoules). Les économies en énergie varieraient, bien entendu, suivant le prix de l'énergie et les écotaxes en vigueur dans chaque région. On estime toutefois que l'application mondiale de ce système serait susceptible de conduire à des économies 200 fois supérieures, à savoir de 600 millions de GJ ou de 6 milliards de mètres cubes d'eau.

TEXTILES ET CUIR

La biotechnologie fondée sur l'utilisation d'enzymes joue un rôle de plus en plus important dans la fabrication des textiles et du cuir. Ce procédé est nettement moins polluant que les techniques classiques. Le tableau 2.7 indique la valeur marchande des enzymes destinées aux textiles et au cuir et la part de marché de la production propre.

Tableau 2.7. **Estimation de la part de marché annuelle de la biotechnologie (VAB) dans l'industrie des textiles et du cuir**

Milliards de dollars

| Secteur | Europe | États-Unis | Japon | Monde |
|--|--------|------------|-------|-------|
| Valeur marchande totale en 1994 | 273 | 239 | 160 | 672 |
| Valeur marchande des enzymes destinées aux textiles (VAB) | 0.3 | 0.2 | 0.1 | 0.6 |
| Valeur marchande des enzymes destinées au cuir (VAB) | 0.2 | 0.2 | 0.1 | 0.5 |
| Valeur marchande de la biotechnologie pour une production propre (VAB) | 0.5 | 0.4 | 0.2 | 1.1 |
| Valeur marchande de la biotechnologie pour une production propre (%) | < 1 % | < 1 % | < 1 % | < 1 % |

Source : OCDE, 1996 ; Novo Nordisk, 1997 ; Godfrey et West, 1996.

Textiles

Sous l'impulsion de la mondialisation et de la concentration, l'industrie textile est en pleine mutation. Une R-D et une fabrication de qualité mondiale, associées à la capacité de repérer, de mettre au point et de commercialiser rapidement de nouvelles technologies, conditionnent la réussite. Cet état de fait a poussé l'industrie textile à rechercher de nouvelles sources d'innovation, notamment du côté de la biotechnologie. La biotechnologie, qui a déjà apporté des contributions appréciables à ce secteur, pourrait y être exploitée davantage, la plupart des fibres textiles étant naturelles ou dérivées de substances naturelles. Les fibres naturelles englobent les fibres cellulosiques telles que le coton, le lin, la ramie et le chanvre et les fibres protéiques telles que la laine et la soie. Les fibres artificielles tirées de substances naturelles comprennent le lyocell, la rayonne et l'acétate de cellulose, qui s'obtiennent tous à partir de la pâte de bois.

A l'heure actuelle, la valeur marchande mondiale des textiles avoisine 672 milliards de dollars (OCDE, 1996). En 1996, le marché mondial des enzymes destinées aux textiles s'élevait à 178 millions de dollars (Novo Nordisk, 1997). La valeur marchande directe des enzymes destinées aux textiles aux États-Unis se chiffrait à 13 millions de dollars en 1994 et à 31 millions de dollars en 1996 (Novo Nordisk, 1997 ; Godfrey et West, 1996). La valeur marchande totale des enzymes employées dans l'industrie textile aux États-Unis, compte tenu des retombées économiques indirectes, est estimée à quelque 200 millions de dollars.

En Europe, la valeur marchande directe des enzymes destinées aux textiles atteignait 28.3 millions de dollars en 1994 et approximativement 41 millions de dollars en 1996 (Novo Nordisk, 1997 ; Godfrey et West, 1996). Du point de vue de l'impact total des enzymes sur les ventes de produits de l'industrie textile, la biotechnologie représente environ 300 millions de dollars. Les données concernant l'Europe et les États-Unis ont été utilisées pour déterminer la taille du marché de la biotechnologie pour la production propre au Japon. Comme les enzymes sont employées par une grande partie de l'industrie aux États-Unis et en Europe, il est vraisemblable que les fabricants japonais en fassent également un grand usage. On estime que la valeur marchande des enzymes se chiffre approximativement à 100 millions de dollars au Japon.

L'application de la biotechnologie aux fibres naturelles permet de créer par modification génétique des plantes résistantes aux herbicides et aux organismes nuisibles, comme celles qui sont produites par Monsanto en vue de résister au ver du cotonnier et à d'autres parasites qui peuvent avoir de

graves répercussions sur le marché du coton (se chiffrant à 20 millions de tonnes/an). Le cotonnier est très vulnérable aux insectes et à d'autres organismes nuisibles ainsi qu'à la concurrence des mauvaises herbes et, malheureusement, tolère mal la plupart des herbicides.

La biotechnologie offre aussi la possibilité de produire des fibres dotées de qualités améliorées ou nouvelles, comme celles du coton génétiquement modifié d'Agricetus, qui contient un gène bactérien codant pour une substance semblable au polyester. La fibre possède, dit-on, la texture du coton, tout en étant beaucoup plus chaude que celui-ci. En outre, Monsanto, Calgene, Agricetus, DuPont, Bayer et d'autres sociétés explorent les possibilités de modifier le coton en vue d'accroître sa résistance, d'améliorer l'affinité et la rétention tinctoriales, d'augmenter sa capacité d'absorption et de le rendre infroissable et irrétrécissable. Des cotons naturellement colorés par des techniques de croisement sont déjà commercialisés. Toutefois la gamme de couleurs est limitée et pourrait probablement bénéficier de méthodes transgéniques. Dans le domaine des fibres animales, l'Australie (CSIRO) et d'autres pays mènent actuellement des études génétiques sur les moutons et les chèvres, en vue de produire des fibres résistantes aux insectes et aux organismes nuisibles, plus douces, plus fines, plus faciles à tondre, etc. La Chine, parmi d'autres pays, étudie des méthodes pour renforcer la résistance du ver à soie aux virus et surmonter sa dépendance à l'égard des feuilles de mûrier, ainsi que pour améliorer la résistance et la finesse de la soie. La chitine et le chitosane, qui peuvent être obtenus à partir de débris de crustacés et mollusques et des tissus de certains champignons, intéressent beaucoup les chercheurs dans le domaine de la cicatrisation des blessures. Une fibre d'alginate de calcium destinée à favoriser la cicatrisation a été mise au point par Courtaulds. L'utilisation de la chitine pour absorber des matières colorantes dans les flux de déchets est à l'étude.

Les chercheurs accordent aussi une grande attention à la production de fibres par les micro-organismes. Zeneca a produit un polyhydroxybutyrate (PHB) naturel par fermentation bactérienne. Le PHB est réputé pour ses bonnes propriétés thermoplastiques et peut être filé. Monsanto se penche sur la modification génétique de plantes destinées à produire du PHB. Il existe d'autres biopolymères dotés d'un potentiel textile, tels que les polylactates, en cours de développement au Japon, et les polycaprolactones, qui font l'objet de recherches aux États-Unis en vue d'applications médicales. Weyerhaeuser et Ajinomoto ont déjà produit une cellulose à partir d'une bactérie, plus fine, plus uniforme et plus élastique que la plupart des fibres de cellulose, et Sony a mis au point des diaphragmes coniques pour haut-parleurs stéréophoniques et des diaphragmes pour écouteurs en cellulose bactérienne. Plusieurs groupes, notamment Protein Polymer Technologies Inc., Allied Steel et Genex, ont lancé des programmes sur la production de polymères protéiques par des micro-organismes. Ils se sont attelés, pour commencer, à la répétition hexapeptidique de la fibroïne de la soie du *Bombyx mori*, à la répétition tripeptidique du collagène de mammifère et à la répétition décapeptidique de la protéine adhésive de *Mytilus edulis*.

Un autre domaine d'investigation concerne la production par des plantes ou des micro-organismes de substances biochimiques (y compris des enzymes) et chimiques utilisées dans la synthèse ou le traitement de fibres naturelles, artificielles et synthétiques. DuPont, par exemple, a mis au point un procédé de fermentation microbienne pour la fabrication du propane-1.3-diol, un ingrédient essentiel de la synthèse du téréphtalate de polytriméthylène, un polyester supérieur au très courant téréphtalate de polyéthylène (PET), mais dont la fabrication à grande échelle revenait trop cher. Dans ce cas l'organisme a été modifié de façon à optimiser le métabolisme du carbone en vue de la production du propane-1.3-diol. Il est également possible de faire fabriquer des produits auxiliaires et teintures pour la fabrication des textiles à des micro-organismes et à des plantes. Genencor International, par exemple, a mis au point un procédé de production de l'indigo faisant appel à un micro-organisme. De surcroît, Genencor International ainsi que Novo Nordisk et d'autres fabricants d'enzymes, ont investi dans la production d'enzymes susceptibles d'être utilisées dans la préparation des fibres, le prétraitement destiné à éliminer les substances indésirables associées aux fibres et les opérations de finissage consistant à modifier les propriétés des fibres et à leur conférer des qualités supplémentaires. Les enzymes peuvent aussi être exploitées dans les procédés de biocatalyse et dans le traitement des déchets.

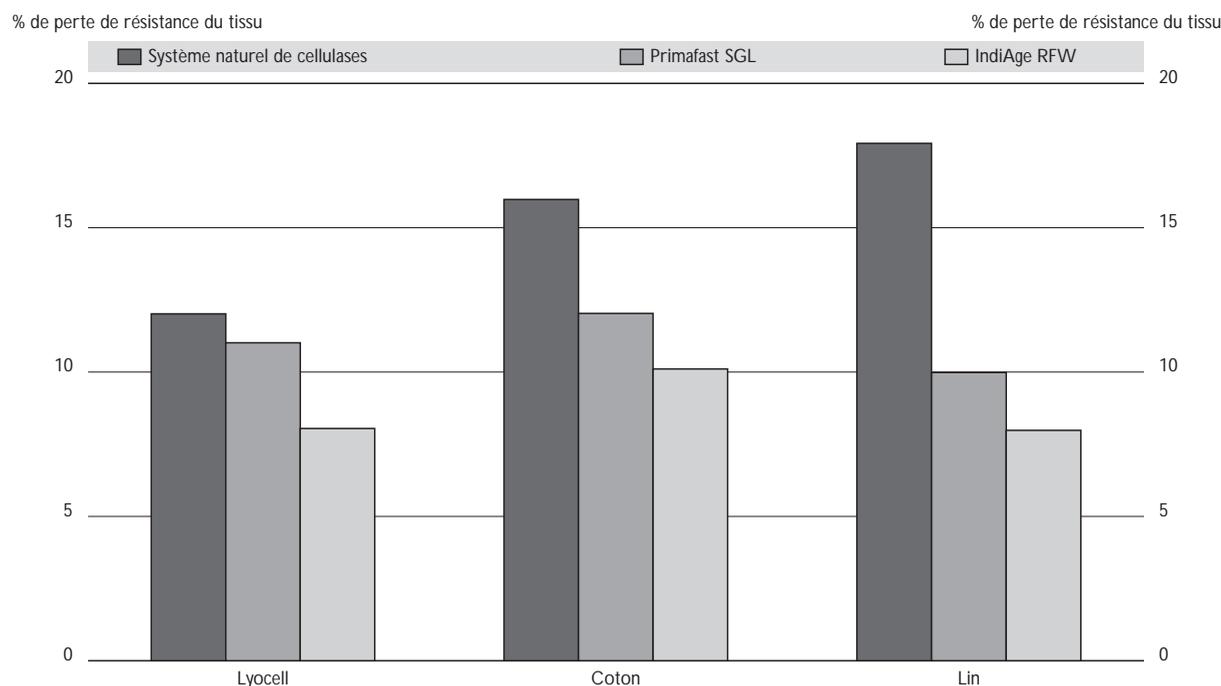
Les enzymes sont utilisées depuis des décennies par l'industrie des détergents, dans les produits destinés au nettoyage et à l'entretien des vêtements. Bien qu'employées dans le traitement des textiles depuis le début de ce siècle pour désamidonner, ce n'est que depuis huit à dix ans que les enzymes ont commencé à être étudiées de façon approfondie en vue d'une vaste gamme d'applications textiles. Une application qui remporte un grand succès est l'utilisation de cellulases pour user le denim. Dans ce cas, les enzymes sont employées à la place des pierres ponceuses ou avec celles-ci en vue de conférer au denim une apparence « usée » ou un aspect décoloré. Divers effets peuvent être obtenus en combinant différentes cellulases et procédés (voir le quatrième chapitre).

Parallèlement, vers la fin des années 80 et le début des années 90, d'autres textiles à base de cellulose destinés ou non à l'habillement ont commencé à être traités par la cellulase, qui confère un « toucher » de qualité et une finition nouvelle à la rayonne, au lin et au coton, tricotés ou tissés. Le traitement à la cellulase procure les qualités suivantes au textile : il l'empêche de pelucher et de boulocher, il augmente sa douceur, sa souplesse et son lustre, avive l'éclat de ses couleurs, le rend plus facile à travailler, améliore son tombant et lui donne un aspect délavé à la mode. Les cellulases sont incorporées à l'heure actuelle dans plusieurs détergents pour éliminer le boulochage ou le peluchage en surface et maintenir l'éclat des couleurs lavage après lavage.

L'emploi des cellulases se répand également dans la production d'une fibre relativement nouvelle, le lyocell, qui est le nom générique de fibres cellulosiques filées au solvant. Le lyocell est filé à partir d'une pâte de bois dans un système fermé contenant un solvant (oxyde d'amine). La solution est ensuite filtrée et extrudée pour former le filament. Comparé à d'autres fibres artificielles, comme la rayonne, le lyocell est plus résistant et s'obtient par un procédé plus respectueux de l'environnement. Néanmoins, la fibre a tendance à fibriller durant sa fabrication. Cette fibrillation est propre au lyocell et peut être maîtrisée par un traitement à la cellulase qui confère un toucher soyeux et luxueux au tissu et rend les couleurs résistantes au lavage. Dans un cas, le traitement enzymatique de lyocell a été effectué à l'aide d'une cellulase Primafast® SGL de Genencor International, une cellulase dont la composition a été spécialement modifiée pour remplir la fonction visée.

Si la cellulase améliore à de nombreux égards la fabrication des textiles, elle risque de diminuer dans une certaine mesure la résistance du tissu. La perte de résistance est étroitement corrélée au type de cellulase utilisé et aux conditions de fabrication. Il existe une grande variété de cellulases naturelles. La plupart sont des systèmes enzymatiques à plusieurs composants. Les enzymes opèrent en synergie pour hydrolyser la cellulose en glucose et en d'autres sucres solubles, qui servent de source d'énergie à l'organisme, ou pour entailler la paroi cellulaire végétale afin de permettre à l'organisme d'accéder aux éléments nutritifs de la cellule. Dans les applications textiles, cependant, l'hydrolyse de la cellulose en glucose ou la destruction de la fibre n'est pas le résultat final recherché. Par une sélection des systèmes de cellulases naturels, par la modification génétique de micro-organismes destinés à produire des compositions de cellulases adaptées et par la modification des protéines enzymatiques pour leur conférer des qualités originales, il est possible d'obtenir les améliorations voulues sans guère altérer la résistance du tissu. La figure 2.1 confronte le brillantage de surface obtenu à l'aide d'un système naturel de cellulases et de cellulases dont la composition a été modifiée avec la perte de résistance du tissu formé à partir de divers substrats cellulosiques. Les compositions modifiées (adaptées à la fonction recherchée), à savoir Primafast® SGL et Indiage® RFW (Genencor International), altèrent nettement moins le tissu.

Les fibres peuvent également être modifiées par des protéases. Elles sont utilisées depuis plusieurs décennies comme agents nettoyants dans les détergents et leur application à la transformation de la laine et de la soie fait actuellement l'objet de recherches. La modification des fibres de la laine vise à empêcher le feutrage et le boulochage, à accroître l'affinité tinctoriale et à assouplir le textile. Propre à la laine, le phénomène du feutrage est dû au mouvement des fibres et à l'emboîtement de fibres voisines, du fait de la structure écailleuse de leur surface, emboîtement qui empêche les fibres de retrouver leur position de départ. Ce phénomène se produit lorsque le textile subit une action mécanique dans des conditions d'humidité. Les écailles provoquent non seulement le feutrage, mais aussi, dans certains cas, une irritation ou une sensation de « picotement ». Les procédés employés actuellement pour prévenir le feutrage incluent un traitement au chlore et l'enduction de la surface des

◆ Figure 2.1. *Brillantage de surface et diminution de la résistance du tissu*

Source : Kumar, et al., 1996.

fibres par des polymères afin de la lisser le plus possible. On étudie la possibilité d'utiliser des protéases pour émousser ou éliminer les écailles. Comme avec les cellulases, on s'efforce d'employer les protéases destinées à prévenir le feutrage en endommageant le moins possible les fibres. On envisage également d'appliquer les protéases au brillantage de surface et à l'assouplissement de la laine et de la soie.

L'utilisation d'enzymes dans la préparation des fibres fait aussi l'objet de recherches. Les procédés de prétraitement font appel à des enzymes pour éliminer le coton adhérent, à des pectinases et à des hémicellulases pour enlever les pectines et les hémicelluloses associées au lin, à des pectinases, hémicellulases, protéases et lipases pour le nettoyage du coton brut, à des oxydoréductases et à des peroxydases pour blanchir les fibres, à des catalases pour éliminer les résidus de peroxyde d'hydrogène provenant du blanchiment des fibres, à des amylases pour éliminer les apprêts à base d'amidon (désamidonnage) et à des protéases pour éliminer une gomme protéique (séricine) associée à la soie naturelle et le traitement du cuir. Cette liste est appelée à s'allonger, non seulement à cause de la recherche d'éléments de valeur ajoutée, mais aussi pour répondre aux préoccupations d'environnement.

Avantages pour l'environnement

Aujourd'hui, les industries du textile et de l'habillement consacrent davantage de temps et d'argent à l'environnement. La réglementation devrait se renforcer à mesure qu'apparaissent de nouvelles technologies permettant de réduire la pollution et les quantités de déchets. La biotechnologie offre déjà des procédés de substitution, tels que l'obtention de coton coloré par modification génétique, le coton biologique et les plantes résistantes aux parasites qui rendent inutile ou moins nécessaire l'application de pesticides, d'engrais artificiels et de produits chimiques agressifs. Toutefois,

avant de pouvoir être commercialisées, les plantes transgéniques doivent recevoir l'approbation des autorités réglementaires dans les pays de destination. A l'heure actuelle, aux États-Unis, trois organismes fédéraux sont concernés : l'Agence pour la protection de l'environnement, le ministère de l'Agriculture, et la *Food and Drug Administration*.

Le délavage du denim avec des enzymes à la place de pierres ponce constitue un exemple de progrès favorable à l'environnement (voir le quatrième chapitre). Les enzymes devraient avoir un impact encore plus grand sur la qualité des effluents à mesure que l'on adopte des procédés biologiques pour la préparation des fibres, le prétraitement et les procédés de finissage destinés à accroître la valeur ajoutée. Les traitements biologiques peuvent aussi servir à supprimer la demande biologique en oxygène (DBO) et à éliminer ou à décolorer les teintures présentes dans les effluents de l'industrie textile. Comme les enzymes sont des catalyseurs très efficaces, même dans des conditions douces, elles ne requièrent pas l'apport énergétique élevé souvent exigé par les transformations chimiques. Si bien que du point de vue de l'environnement, la biotechnologie permet de concevoir des procédés moins polluants et à meilleur rendement énergétique, de confectionner des produits de plus haute qualité et d'épurer les effluents.

Cuir

En 1996, les ventes d'enzymes à l'industrie du cuir ont atteint 80 millions de dollars (BUNR, 1996). Aux États-Unis, les enzymes appliquées à la transformation industrielle du cuir représentent un marché de 10.5 millions de dollars qui s'accroît de quelque 2 pour cent par an et devrait atteindre 12.8 millions de dollars d'ici à 2006. L'utilisation des enzymes dans cette industrie a été passée en revue par Taylor *et al.* (1987) et par Godfrey et West (1996).

Les peaux et les dépouilles renferment des protéines et des graisses entre les fibres de collagène. Avant le tannage, ces substances doivent être en partie ou totalement éliminées. Les protéines peuvent être enlevées par des protéases et les graisses par des lipases, ainsi que par des agents tensio-actifs et des solvants. De nos jours, les protéases sont utilisées principalement pour le trempage, le confitage et l'ébourrage activé par des enzymes. L'utilisation de lipases pour dissoudre et éliminer les graisses en est encore au stade de la recherche.

Lors de la préparation des dépouilles et des peaux, il importe de tremper convenablement la matière première afin d'obtenir un cuir de bonne qualité. Certaines matières premières sont stockées en atmosphère sèche et leur réhydratation à un degré satisfaisant risque d'être difficile et de prendre du temps. L'utilisation des protéases et des carbohydratases pour dégrader les protéines et les hydrates de carbones interfibrillaires améliore sensiblement l'absorption d'eau et raccourcit l'opération de trempage.

Le procédé d'ébourrage traditionnel fait appel à des produits chimiques tels que le lait de chaux et le sulfure de sodium. Ceux-ci dissolvent complètement le poil et font éclater la structure de la fibre. Toutefois l'addition d'enzymes permet de diminuer la quantité de produits chimiques requise et, de surcroît, d'obtenir un produit plus propre, un meilleur rendement par unité de surface et une réduction de la charge de produits chimiques dans les effluents. Notamment grâce au fait que les poils ne sont plus dissous et peuvent donc être filtrés, la demande chimique et biologique en oxygène des déchets est abaissée.

Les lipases commencent à remplacer les solvants et les agents tensio-actifs lors du dégraissage. Les enzymes présentent l'avantage de moins interférer avec la structure de la peau. En outre, le procédé enzymatique est plus respectueux de l'environnement que les procédés à base de solvants et d'agents tensio-actifs.

Le dégraissage des peaux de moutons a été introduit récemment. La part des peaux de mouton sur le marché mondial représente environ 30 pour cent de la fabrication des cuirs. Le procédé de dégraissage enzymatique remplace un procédé recourant à un solvant à base de paraffine, si bien qu'il est plus favorable à l'environnement. Les investissements et les coûts d'exploitation associés à la récupération et à la réutilisation de la paraffine sont élevés. En dehors de ses avantages pour l'environnement, le traitement enzymatique améliore également la qualité du produit final et diminue les coûts.

Le produit obtenu selon le procédé enzymatique se déchire moins facilement et présente une teinte plus uniforme (TME, 1994). Le remplacement du dégraissage au solvant par un procédé enzymatique peut abaisser les coûts d'au moins 25 pour cent, suivant le type de traitement appliqué par l'usine. Le procédé biotechnologique occupe une part de 30 à 50 pour cent sur le marché mondial. Des applications à grande échelle sont pratiquées en Australie, en Angleterre et en France. Cependant, le recours à cette technologie n'a pas été relevé en Europe méridionale, qui est une grande zone de production de peaux de mouton.

Afin de rendre le cuir pliable, il est nécessaire de soumettre la matière première à un traitement enzymatique avant le tannage. Durant cette opération, appelée confitage, certains composants protéiques sont dissous et peuvent être évacués par rinçage. L'intensité du confitage dépend du degré de souplesse désiré pour le produit fini. L'agent de confitage traditionnel se compose d'excréments; Pline a décrit l'utilisation de la fiente de pigeon à cette fin il y a plus de 2000 ans. En 1908, le chimiste allemand Otto Röhm a breveté le premier procédé de confitage normalisé à base d'enzymes pancréatiques. De nos jours, on recourt à des protéases bactériennes et à la trypsine (la protéase pancréatique traditionnelle) pour le confitage, bien que des enzymes extraites de champignons et de plantes aient également été testées.

En composant judicieusement des mélanges d'enzymes destinés à dissoudre des constituants particuliers de la peau, tels que l'élastine, il est possible d'imprimer de subtiles modifications aux propriétés du produit final.

ALIMENTATION HUMAINE ET ANIMALE

En Europe, la totalité des VAB dans le secteur des aliments et boissons est estimée à une valeur comprise entre 10 et 17 milliards de dollars (Smith, 1996; Ballantine et Thomas, 1997). En partant de l'hypothèse que 50 à 80 pour cent des opérations biotechnologiques conduites dans ce secteur participent à la production plus propre, la valeur marchande de la biotechnologie dans l'industrie alimentaire se situe entre 5 et 14 milliards de dollars (tableau 2.8). Cela recouvre toute la biotechnologie, tant la biotechnologie traditionnelle que la technologie des bioréacteurs, les enzymes et d'autres procédés de pointe. L'utilisation des enzymes est probablement l'application la plus répandue.

Tableau 2.8. **Estimation des parts de marché de la biotechnologie (VAB) dans l'industrie de la transformation des aliments, de la production des boissons et des aliments pour animaux**

Milliards de dollars

| Valeur marchande* | Europe | États-Unis | Japon | Monde |
|---|--------|------------|-------|-------|
| Total | 717** | 483 | 401 | 1 601 |
| Total des VAB | 10-17 | 10-17 | 2 | 22-36 |
| Biotechnologie pour une production propre | 5-14 | 5-14 | 1-2 | 11-30 |
| Biotechnologie pour une production propre/VAB (%) | 1-2 % | 2-4 % | < 1 % | 1-2 % |

* La taille totale du marché des secteurs manufacturiers sélectionnés a été calculée à partir de données de l'OCDE se rapportant à la production totale, diminuée des exportations et augmentée des importations.

** L'estimation relative à l'Europe est basée sur la valeur marchande en France, en Allemagne, en Italie et au Royaume-Uni.

Source : Smith, 1996; Ballantine et Thomas, 1997; OCDE, 1996.

Comme la totalité des VAB n'a pas été chiffrée pour le secteur alimentaire aux États-Unis, elle a été estimée à partir de la taille totale du marché de ce secteur, et la contribution de la biotechnologie a été déduite des ventes d'enzymes dans ce secteur en Europe et aux États-Unis. Les données concernant la taille réelle du marché des enzymes alimentaires diffèrent entre l'Europe et les États-Unis. Toutefois, plusieurs sources suggèrent que le marché des enzymes alimentaires présente la même taille aux

États-Unis et en Europe, avec un montant total des ventes atteignant 220 millions de dollars pour chaque région (Bickerstaff, 1995 ; Novo Nordisk, 1997 ; Godfrey et West, 1996). C'est pourquoi la totalité des VAB dans le secteur de l'alimentation humaine et animale et des boissons aux États-Unis est également estimée à une valeur comprise entre 10 et 17 milliards de dollars. Aux États-Unis, la biotechnologie joue un plus grand rôle dans la transformation des aliments, les boissons et les aliments pour animaux qu'en Europe, les consommateurs américains acceptant plus facilement les aliments confectionnés à l'aide de la biotechnologie moderne. Au Japon, l'impact total de la biotechnologie est estimé à 2 milliards de dollars sur un marché alimentaire qui avoisinait 401 milliards de dollars en 1993 (Ballantine et Thomas, 1997 ; OCDE, 1996).

Avec un taux de pénétration sur le marché de 2 à 4 pour cent, la contribution de la biotechnologie aux procédés industriels propres dans l'industrie alimentaire est supérieure aux États-Unis. En Europe, elle a conquis 1 à 2 pour cent du marché, tandis qu'au Japon, sa part de marché s'avère négligeable jusqu'à présent. Il semblerait que l'impact réel de la biotechnologie soit quelque peu supérieur. La biotechnologie représente un outil précieux pour l'industrie alimentaire et peut augmenter substantiellement la valeur ajoutée du produit alimentaire final. Toutefois, des évolutions telles que la modification génétique du soja ne sont pas prises en compte dans les données exposées ici, et comme des dérivés du soja sont incorporés à plus de 30 000 produits alimentaires, les retombées économiques de ce type de produit issu de la biotechnologie sont considérables. L'estimation de la contribution de la biotechnologie aux procédés industriels non polluants dans le secteur de l'alimentation humaine et animale et des boissons risque par conséquent d'être en deçà de la réalité.

Ingrédients et additifs alimentaires

Les protéines, les glucides et les lipides représentent les composés alimentaires de base des matières premières agricoles. Il est théoriquement possible de produire ces trois catégories de composés à partir d'autres sources, en recourant à la fermentation microbienne ou aux cultures de tissus végétaux. Deux éléments constitutifs des protéines, l'acide glutamique et la lysine, sont déjà produits en grandes quantités par fermentation et utilisés dans l'alimentation animale (une application agricole).

Les recherches visant à améliorer la nutrition dans les pays en développement se sont concentrées avant tout sur les protéines d'organismes unicellulaires, et, avant la hausse des prix du pétrole brut dans les années 70, les hydrocarbures dérivés du pétrole étaient considérés comme un substrat approprié. Aux États-Unis, Amoco et Phillips Petroleum ont mis au point des procédés s'appliquant à la levure, suffisamment performants pour produire des arômes à base de levure, mais pas assez économiques pour fabriquer des ingrédients protéiques de base. Au Royaume-Uni, Rank Hovis McDougall et ICI ont conçu un procédé mettant en jeu un champignon, le *Fusarium*, et sont passés à un substrat traditionnel (autre qu'un hydrocarbure). Ce produit a reçu une première autorisation de mise sur le marché en 1985 et est actuellement commercialisé en Europe sous la dénomination « mycoprotéine Quorn » par Marlow Foods, filiale de Zeneca.

Parmi les applications de la biotechnologie dans le domaine alimentaire, la production d'ingrédients de base à partir de sources non traditionnelles aurait l'incidence la plus sensible sur l'environnement en raison des volumes en jeu. Ces applications ont peu de chances de voir le jour dans un avenir proche, compte tenu du coût relativement faible des ingrédients traditionnels (tels que les protéines du soja) et du coût relativement élevé des substrats de remplacement (tels que les hydrocarbures du pétrole).

Les additifs alimentaires englobent les gommages, les émulsifiants, les vitamines, les minéraux, les conservateurs, les levains, les acidulants, les arômes et les colorants. Les préférences du consommateur pour les produits « naturels » confèrent un avantage aux additifs issus de la biotechnologie sur les additifs produits par synthèse chimique, si leur prix est compétitif. Les additifs d'origine biotechnologique provenant de sources non recombinées incluent, par exemple, la gomme de xanthane tirée du *Xanthomonas campestris* et l'acide citrique produit par *Aspergillus niger*. L'une des applications potentielles les plus débattues est la production d'arômes naturels (tels que la vanilline) par des cultures de tissus végétaux, mais elle n'a pas encore eu d'impact commercial.

Les conservateurs issus de la fermentation forment une autre catégorie prometteuse. La plupart des conservateurs alimentaires traditionnels sont des acides gras ou d'autres acides organiques obtenus par synthèse chimique, qui diminuent le pH des aliments et inhibent le développement d'un large spectre de micro-organismes. L'une des évolutions observées consiste à mettre au point des conservateurs produits par fermentation tels que « Upgrade » (conçu par Stauffer Chemical et fabriqué actuellement aux États-Unis par l'unité Quest d'ICI), contenant le même ingrédient actif (l'acide propionique) que le propionate de calcium obtenu par voie chimique. D'autres conservateurs issus de la fermentation, tels que le Delvocid (pimaricine), produit à partir de *Streptomyces natalensis* par la société néerlandaise Gist-brocades, ou la nisine, fabriquée à partir de *Streptococcus lactis* par l'entreprise australienne Burns Philp, possèdent des caractéristiques ou des applications très spécifiques. Les bactériocines telles que la nisine présentent un intérêt certain parce qu'elles peuvent être produites par des bactéries lactiques respectueuses de l'environnement et sont efficaces pour lutter contre des agents pathogènes particulièrement résistants tels que *Listeria monocytogenes*.

Les avantages écologiques de la production d'additifs alimentaires par fermentation ou par des voies enzymatiques plutôt que par synthèse organique sont analogues à ceux associés à la fabrication d'autres spécialités chimiques, notamment la réduction du nombre d'étapes du procédé et de l'utilisation des solvants organiques. Dans le cas des conservateurs produits par fermentation, on obtient un effet encore plus favorable en incorporant le milieu de culture dans le produit fini. La situation la plus souhaitable consiste à utiliser des cultures produisant des bactériocines *in situ* pour les aliments fermentés (tels que les saucisses fermentées ou la choucroute), car elles y consomment les glucides instables, conservent naturellement le produit fini et apportent leur propre valeur nutritive.

Les adjuvants de transformation, y compris les enzymes, sont généralement ajoutés en petites quantités afin de remplir leur fonction durant la fabrication, mais ne forment qu'une proportion insignifiante du produit fini. Le marché mondial des enzymes industrielles totalise environ 1.5 milliard de dollars, dont quelque 10 pour cent se rapportent à la transformation de l'amidon et 20 pour cent à d'autres applications alimentaires (Novo Nordisk, 1996).

La fabrication de l'amidon passe par la conversion du maïs ou d'autres céréales en dextrose et en d'autres sirops par hydrolyse. Autrefois, cette réaction était conduite en milieu acide, à pression et température élevées, mais le rendement en dextrose était limité à quelque 80 pour cent et ce procédé onéreux entraînait des risques et la formation de grandes quantités de sel comme sous-produit. Le début du passage à l'hydrolyse enzymatique dans les années 60 a accru le rendement en dextrose et supprimé les inconvénients de la transformation en milieu acide. Dans les années 70, la mise au point d'enzymes immobilisées, les glucoses isomérases, a permis de produire du sirop de glucose à forte teneur en fructose. Dans les années 80, les alpha-amylases thermostabilisées ont contribué à augmenter les rendements et dans les années 90, les amylases thermostabilisées produites par recombinaison ont abaissé les coûts.

La chymosine, ou présure, est l'une des enzymes alimentaires issues d'une recombinaison dont l'application a eu l'impact le plus prononcé. Elle était naguère extraite de l'estomac du veau et sert à coaguler le lait au cours de l'élaboration des fromages. Le gène de cette enzyme a été cloné dans des micro-organismes pour qu'elle puisse être produite par fermentation. Pfizer a commencé à fabriquer de la chymosine à partir de la bactérie *E. coli* en 1990, Gist-brocades a suivi en employant la levure *Kluyveromyces lactis* en 1992 et Genencor International s'y est mis à son tour en utilisant le champignon *Aspergillus niger* en 1993 (Maryanski, 1995).

La panification fait traditionnellement appel à des enzymes, en ce sens qu'elle utilise du malt d'orge pour normaliser l'activité de l'amylase (dégradation de l'amidon) de la farine de blé. Depuis les années 70, les enzymes fongiques ont partiellement remplacé le malt à cet effet. Différentes amylases dont l'activité se situe dans un optimum de température « intermédiaire » spécifique ont commencé à être employées afin de retarder le rassissement du pain dans les années 80 et cette application s'est développée dans les années 90, avec l'introduction de produits de recombinaison. On a été amené à remplacer le bromate de potassium qui servait d'oxydant dans la farine destinée à la fabrication du pain par des combinaisons de la glucose oxydase avec d'autres enzymes, à cause de l'éventuel pouvoir cancérigène du bromate. Des hémicellulases issues ou non de la recombinaison sont utilisées pour

améliorer l'élaboration et le moelleux des pains complets et des pains enrichis en fibres. Plus récemment, des lipases obtenues par recombinaison ont été introduites afin de remplacer ou de compléter les graisses et les émulsifiants ajoutés pour conférer volume et moelleux au pain (tableau 2.9), bien que toutes ces enzymes puissent être tirées de sources non recombinées.

Tableau 2.9. **Enzymes alimentaires issues d'une recombinaison**

| Produit | Société | Nom commercial | Application | Année |
|---------------|--------------------|----------------|-------------------|-------|
| Amylase | CPC International | | Amidon | 1986 |
| Amylase | Enzyme Bio-Systems | Megadex | Amidon | 1988 |
| Amylase | Novo Nordisk | Novamyl | Panification | 1990 |
| Chymosine | Pfizer | Chy Max | Produits laitiers | 1990 |
| Amylase | Novo Nordisk | Termamyl | Amidon | 1991 |
| Chymosine | Gist-brocades | Maxiren | Produits laitiers | 1992 |
| Chymosine | Genencor Intern. | Chymogen | Produits laitiers | 1993 |
| Xylanase | Novo Nordisk | Pentopan Mono | Panification | 1995 |
| Lipase | Novo Nordisk | Novozym 677 | Panification | 1995 |
| Décarboxylase | Novo Nordisk | Maturex | Brasserie | |
| Amylase | Gist-brocades | Dex-lo | Alcool | |
| Amylase | Gist-brocades | Maxamyl | Alcool | |
| Protéase | Gist-brocades | Bakezyme | Panification | |
| Glucanase | Gist-brocades | Filtrase | Brasserie | |
| Xylanase | Gist-brocades | Fermizyme | Panification | |
| Xylanase | Genencor Intern. | Multifect | Alimentation | |
| Xylanase | Röhm Enzyme | Veron | Panification | |

Source : Dr. Kevin Kraus, communication personnelle.

Une application extrêmement prometteuse à l'égard de la protection de l'environnement consiste à utiliser la biotechnologie pour convertir les flux de déchets d'un procédé en matières premières d'un autre, ou à traiter des matières premières sous-utilisées afin d'augmenter leur valeur. Les idées abondent : on propose, notamment, d'autres usages pour un résidu du pressage, le marc de raisin, d'employer la rafle (de l'épi de maïs) comme substrat de la production d'acide citrique, et les déchets de la canneberge comme substrat pour des inoculum fongiques (Hang et Woodams, 1997; Pina *et al.*, 1997; Zheng et Shetty, 1997).

Le secteur des produits laitiers ouvre des perspectives particulièrement séduisantes, en raison des grandes quantités de petit lait (lactosérum) qui sont produites au cours de l'élaboration des fromages dans des lieux centralisés. La production de *Kluyveromyces* et d'autres levures à fermentation lactique, en tant qu'agents de sapidité, a donné de bons résultats. D'autres tentatives visant à hydrolyser le lactose par voie enzymatique pour permettre son utilisation par la levure ordinaire de boulangerie ont échoué, et les levures de boulangerie recombinées capables de réaliser directement la fermentation du lactose n'ont pas encore été commercialisées.

Techniques d'analyse

Les méthodes biotechnologiques employées pour l'analyse des aliments sont identiques à celles des applications cliniques, mais s'utilisent à la fois pour la régulation des procédés et la détection des agents pathogènes. Les méthodes phénotypiques, notamment les techniques de l'immuno-essai, classent les micro-organismes d'après leur comportement et leur composition. Elles sont utiles pour dénombrer les agents pathogènes et les regrouper en grandes catégories, et ont servi de base à l'établissement de la plupart des normes de sécurité des aliments. Les méthodes plus récentes fondées sur le sous-typage moléculaire, y compris les techniques de réaction en chaîne de la polymérase, s'appuient sur l'assortiment génétique unique d'une cellule pour offrir une procédure différente

et plus précise d'identification des organismes pathogènes. Elles peuvent également s'appliquer à l'étude de souches spécifiques au sein d'un mélange de populations bactériennes, ce qui les rend particulièrement utiles dans la régulation des procédés.

Même dans des pays développés comme les États-Unis et le Canada, des dizaines de millions de cas d'intoxication alimentaire sont recensés chaque année. La rapidité avec laquelle les denrées périssables sont transformées et distribuées implique que la vitesse doit être une caractéristique essentielle de la détection des agents pathogènes; cependant, les méthodes de culture traditionnelles peuvent prendre quatre jours ou davantage. Entre le début de la procédure de détection et le moment où l'on obtient les résultats, d'autres produits ont pu être contaminés ou consommés. Les nouvelles méthodes d'immuno-essai et du sous-typage moléculaire présentent l'avantage de livrer les résultats en quelques heures au lieu de quelques jours.

La surveillance d'un mélange de populations microbiennes dans des milieux complexes, tels que le vin, le yaourt, les saucisses fermentées ou la choucroute, représente un défi sans précédent du point de vue de la régulation des procédés. Dans ces circonstances, les méthodes de culture traditionnelles sont pratiquement impossibles à appliquer; les nouvelles techniques du sous-typage moléculaire permettent, pour la première fois, de comprendre et de maîtriser des procédés que nous exploitons depuis longtemps.

Qualicon, une filiale de DuPont, applique les techniques du sous-typage moléculaire à la détection des agents pathogènes. Elle a commercialisé le « Riboprinter », un système automatique qui utilise l'empreinte génétique de l'ARN ribosomique, réalisée à l'aide d'une enzyme de restriction, afin de caractériser les bactéries et de retrouver le signalement correspondant dans une base de données. Elle propose également plusieurs versions de « BAX », un test rapide fondé sur la réaction en chaîne de la polymérase (PCR) qui permet de détecter des organismes spécifiques en fonction de fragments d'ADN sélectionnés (Bruce, 1996).

La société française SigmO applique également les techniques du sous-typage moléculaire dans la régulation des procédés, en coopération avec l'ITV (Institut technique de la vigne et du vin) et la société canadienne Lallemand. Elle est spécialisée dans l'identification au niveau intraspécifique de levures et de bactéries, notamment en vue de confirmer la présence ou l'absence de souches non pathogènes ayant une importance commerciale. SigmO recourt à diverses techniques, en particulier l'analyse de l'ADN mitochondrial à l'aide d'une enzyme de restriction, l'électrophorèse à champ alternatif et la PCR (Fleurent *et al.*, 1997).

Il est possible d'appliquer le système automatique de Qualicon aux types de techniques de SigmO. Qualicon a créé une base de données pour les bactéries lactiques, et des chercheurs de l'Université de Floride ont récemment fait état de l'utilisation du Riboprinter pour surveiller des cultures intervenant dans la fermentation des saucisses fermentées et de la choucroute (Freund *et al.*, 1997; McCardell *et al.*, 1996).

Dans la plupart des cas, les applications à la transformation des aliments passent par l'utilisation en enceinte fermée d'organismes issus d'une recombinaison pour produire un ingrédient, un additif ou un adjuvant de transformation, qui eux-mêmes, ne contiennent pas le micro-organisme viable. Les prescriptions en matière de sécurité des aliments imposent généralement d'utiliser des organismes non toxigènes et non pathogènes, offrant ainsi une marge de sécurité supplémentaire. La possibilité de libération volontaire ou involontaire de l'organisme dans les flux de déchets atmosphériques, liquides ou solides ne pouvant être exclue, les aspects à prendre en considération sont les mêmes que pour n'importe quel type de dissémination dans l'environnement :

- possibilité de survie de l'organisme recombiné dans l'environnement;
- gamme d'hôtes de l'organisme utilisé pour exprimer le gène transféré
- utilisation du substrat;
- compétitivité avec d'autres organismes;
- production de protéines ou de polysaccharides.

On suppose généralement qu'en transférant du matériel génétique entre organismes différents, en vue de produire des micro-organismes intergénériques, on accroît le risque d'introduire de nouveaux caractères et de rendre moins prévisible le comportement des nouveaux organismes. Cette hypothèse n'est pas prouvée, mais elle commande une attitude de prudence.

Reprenons l'exemple des enzymes obtenues par recombinaison : les organismes libérés à la suite d'une production normale faisant appel à des hôtes couramment utilisés ne semblent pas soulever de problème d'environnement. Des données concernant un site sur lequel des organismes recombinés ont été libérés continuellement, de façon involontaire, dans les flux de déchets, durant une période de presque dix ans, ne font état d'aucun organisme récupérable et, par conséquent, d'aucune trace de leur survie ou de leur établissement dans l'environnement (Krause et Nayberg, 1997).

Aliments pour animaux

La biotechnologie moderne joue un rôle non négligeable dans la production de micro-ingrédients pour l'alimentation animale, mais du point de vue du volume et des ventes, les produits issus d'une synthèse chimique remportent la plus grande part de marché. A l'exception de quelques produits plus récents, le marché des micro-ingrédients se développe *grosso modo* au même rythme que l'ensemble du marché des aliments pour animaux. En 1995, le volume des aliments manufacturés pour animaux s'est élevé à 600 millions de tonnes. Le marché des aliments destinés à la volaille, aux porcs et aux ruminants devrait s'accroître régulièrement (jusqu'à 5 pour cent par an), et celui des aliments employés en aquaculture progresse plus rapidement (10 à 20 pour cent par an).

On prévoit une augmentation de l'application de la biotechnologie moderne à la production d'acides aminés, d'enzymes, de vitamines, de caroténoïdes et d'autres micro-ingrédients pour l'alimentation animale. De surcroît, les céréales dont la valeur nutritive a été améliorée par voie transgénique devraient avoir des répercussions sur le marché de ces micro-ingrédients, probablement durant la prochaine décennie. Comme les sources de protéines habituelles des aliments pour animaux (par exemple, le soja, la farine de poisson, le blé et le maïs) sont déficientes en méthionine, en lysine, en thréonine et en tryptophane, ces acides aminés essentiels sont rajoutés aux rations alimentaires des animaux monogastriques, par exemple la volaille et les porcs. Pour remplir les besoins nutritionnels relatifs à ces acides aminés essentiels, on peut fournir un excès de protéines. Il existe toutefois une solution plus économique et plus favorable à l'environnement qui consiste à apporter un niveau minimal de protéines combiné à un supplément d'acides aminés essentiels. La DL-méthionine est produite par synthèse chimique (300 000 tonnes en 1996), mais la L-lysine, la L-thréonine et le L-tryptophane proviennent de fermentations industrielles effectuées à l'aide de mutants de *Corynebacterium glutamicum* et de souches recombinées d'*E. coli*. Les principaux producteurs d'acides aminés sont Ajinomoto, Archer Daniel Midland, Degussa, Eurolysine, Fermas, Kyowa Hakko, Samsung et Sewon. En 1996, le marché des acides aminés destinés aux aliments pour animaux avoisinait les 2 milliards de dollars.

La production de L-lysine, qui atteignait 280 000 tonnes en 1996 et qui progresse de 7 pour cent par an, utilise des mutants de *C. glutamicum* obtenus selon des méthodes classiques de mutation et de sélection. Le procédé de production discontinu est suivi par la séparation du milieu de culture et de la biomasse, la purification du produit contenu dans le milieu de culture par échange d'ions, et enfin la cristallisation ou le séchage par pulvérisation du produit sous la forme de chlorhydrate de L-lysine. La fabrication de L-thréonine à partir d'*E. coli* modifiées totalisait 10 000 tonnes en 1996. Ici aussi, à l'issue de la fermentation, on enlève la biomasse avant de purifier la L-thréonine à partir du milieu de culture. Le L-tryptophane est le quatrième facteur limitant parmi les acides aminés essentiels dans l'alimentation des porcs et de la volaille. Il existe un marché naissant pour le procédé biotechnologique qui est encore au stade de la mise au point. Des souches recombinées de *C. glutamicum* et d'*E. coli* ont été obtenues et sont utilisées, mais la transformation en aval est délicate (le L-tryptophane est sensible à l'oxygène et à la chaleur) et demande des compétences très pointues.

Des enzymes sont ajoutées aux aliments pour animaux en vue de dégrader des composants de matières premières qui limitent la digestibilité ou augmentent le volume de déjections et l'excrétion d'azote et de phosphore. Les exemples les plus connus de l'action des enzymes incorporées à

l'alimentation des animaux concernent les endoxylanases et les phytases (voir encadré 2.7). Les endoxylanases dépolymérisent les arabinoxylanes présents dans le blé et le maïs, ce qui accroît la digestibilité de tous les nutriments et diminue la production de déjections, d'azote et de phosphore. Les phytases hydrolysent l'acide phytique et libèrent du phosphate minéral, supprimant ainsi la nécessité d'ajouter des phosphates minéraux à la ration et réduisant l'excrétion de phosphore. L'industrie des aliments pour animaux utilise également d'autres enzymes telles que les protéases, les alpha-galactosidases, les endoglucanases et les alpha-amylases. Les micro-organismes employés pour fabriquer les enzymes destinées à l'alimentation animale incluent *Trichoderma* sp. (endoxylanases et endoglucanases), *Aspergillus* sp. (endoxylanases, phytases, alpha-galactosidases, protéases), *Humicola* sp. (endoxylanases et endoglucanases) et *Bacillus* sp. (protéases et alpha-amylases). Certaines de ces enzymes sont produites par la technologie de l'ADN recombiné, mais les procédures classiques de mutation et de sélection jouent encore un rôle substantiel. A l'avenir, certaines enzymes pour l'alimentation animale pourraient être produites à partir des plantes transgéniques.

Encadré 2.7. Enzymes dans l'alimentation animale

A l'heure actuelle, parmi tous les débouchés des enzymes, l'alimentation animale est celui qui connaît l'expansion la plus rapide, avec des ventes d'enzymes estimées à quelque 120 millions de dollars à l'échelle mondiale. La phytase, par exemple, est ajoutée aux aliments destinés à la volaille et aux porcs afin de libérer le phosphate de composés qui en contiennent (phytates) dans la nourriture. S'agissant de l'élevage des porcs, le rejet de phosphates dans les déjections est abaissé de 30 pour cent. Pour un pays comme les Pays-Bas, cela équivaldrait à une diminution des phosphates libérés dans l'environnement de 20 000 tonnes par an. L'augmentation du coût des aliments pour animaux est marginal pour l'agriculteur (environ 0.2 pour cent), de plus, il est compensé par une réduction de la taxe sur les rejets de phosphate.

Source : TME, 1994.

L'industrie des aliments pour animaux a particulièrement besoin d'enzymes capables de supporter des transformations à haute température, compte tenu des températures élevées engendrées au cours de la pelletisation. Les extrémophiles constituent une source potentielle d'enzymes de ce type. Les enzymes provenant de sources aussi exotiques seront très probablement fabriquées par des micro-organismes se prêtant mieux à la production.

Le marché des enzymes destinées à l'alimentation animale accuse une croissance supérieure à 25 pour cent par an. En 1996, sa valeur mondiale avoisinait les 100 millions de dollars. En 1997, certains marchés étaient proches de la saturation (enzymes pour les aliments à base de blé et d'orge destinés à la volaille), tandis que d'autres sont en plein essor (enzymes pour l'alimentation à base de maïs et le secteur de l'environnement), et que de nouveaux créneaux apparaissent pour les ruminants et l'aquaculture. Les principaux fournisseurs d'enzymes destinées à l'alimentation animale sont Finnfeeds (avec Genencor), BASF (avec Gist-brocades), Novo Nordisk et Hoffmann-La Roche.

On ajoute des vitamines à la ration alimentaire des animaux afin d'optimiser sa valeur nutritive, qui requiert les treize vitamines et du chlorure de choline. La plupart des vitamines sont fournies dans des préparations spéciales qui garantissent la stabilité et la biodisponibilité du produit. L'industrie des aliments pour animaux utilise un mélange préalable de vitamines optimisé en vue de répondre aux besoins spécifiques de l'animal. Le marché de l'ensemble des vitamines pour l'alimentation animale (y compris le chlorure de choline) représentait environ 1.4 milliard de dollars en 1996 et progressait de 1 à 3 pour cent. Les vitamines E, C et A, le chlorure de choline, la vitamine B₂, l'acide nicotinique, le Calpane et la vitamine B₁₂ sont les vitamines les plus importantes dans les aliments pour animaux. Les autres sont essentielles, mais présentes en quantités plus faibles.

On dispose à l'heure actuelle de quantités suffisantes de vitamines pour satisfaire la demande du secteur de l'alimentation animale. Trois grandes méthodes de production sont appliquées :

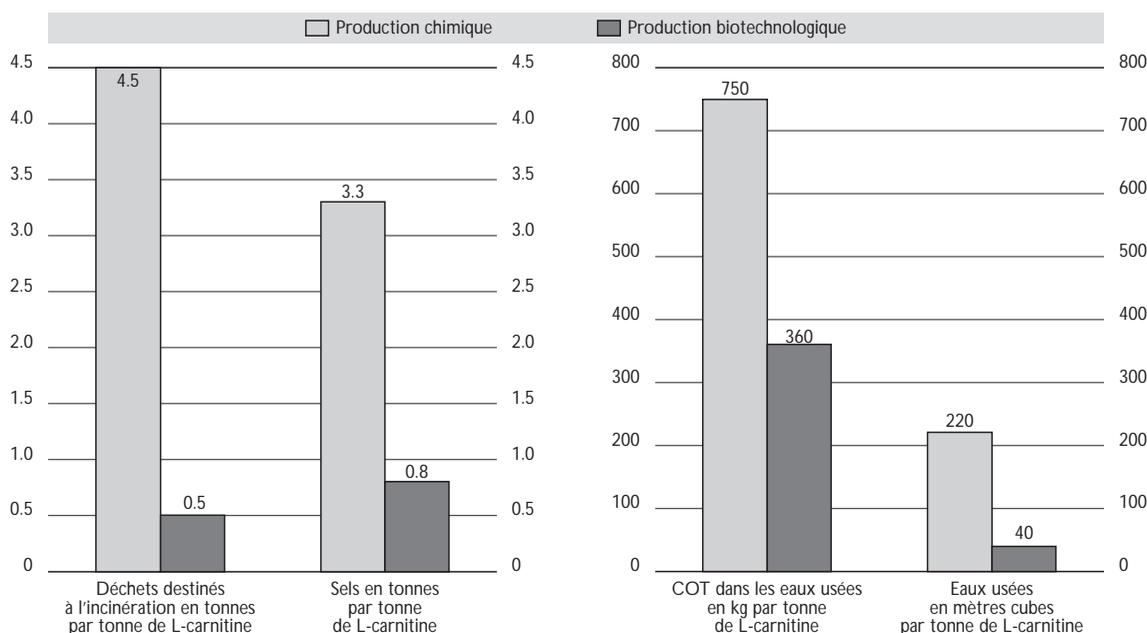
- la synthèse chimique;
- la fermentation;
- l'extraction à partir de plantes ou de produits végétaux.

La plus importante de celles-ci est la synthèse chimique. En fait, à l'exception de la vitamine B₁₂, toutes les vitamines sont produites par voie chimique. La vitamine B₁₂ (cyanocobalamine) procède exclusivement de la fermentation, sa structure étant bien trop complexe pour se prêter à une synthèse industrielle. Certaines vitamines, telles que la B₂ (riboflavine) et la C (acide ascorbique) sont produites aussi bien par voie biotechnologique que par voie chimique. Les principaux producteurs de vitamines sont Hoffmann-La Roche, BASF, Rhône-Poulenc et Takeda. D'autre part, des fabricants tels que LONZA, Degussa et quelques sociétés chinoises sont équipés pour produire de grands volumes d'une seule catégorie de vitamines.

La vitamine E est fabriquée par voie semi-synthétique sous forme de sous-produit de l'élaboration de l'huile de soja. Au cours du procédé, un mélange de tocophérols est isolé par distillation moléculaire et par chromatographie. Sa méthylation fournit le produit commercial, l'alpha-tocophérol. La bétaine, donneur primaire de méthyle, est considérée comme une quasi-vitamine, elle est produite par séparation et cristallisation à partir de la mélasse de betterave.

La production de vitamine B₂ (autour de 1 000 tonnes) s'effectue à partir de diverses souches, telles que des mutants d'*Ashbya gossypii*, de *Candida flaveri*, de *Bacillus subtilis* et de *Corynebacteria*. A l'exception d'*Ashbya gossypii*, les souches sont recombinées. La fermentation est suivie de la séparation du milieu de culture et de la biomasse, d'une purification et d'un séchage par pulvérisation. Quelque

◆ Figure 2.2. *Traitements des déchets : comparaison entre la production chimique et biotechnologique de L-carnitine*



7 à 8 tonnes de vitamine B₁₂ proviennent d'une fermentation réalisée par des souches de *Pseudomonas* ou de *Propionibacterium*. Après fermentation et filtration, le précurseur est transformé en cyanocobalamine par voie chimique.

Le procédé de fermentation qui fournit la vitamine C convertit du sorbitol (producteurs chinois) ou du glucose en acide L-cétogulonique qui, après isolation et purification, est transformé par une étape chimique en vitamine C.

Un nouveau produit, la L-carnitine, qui est un cofacteur essentiel du transport des acides gras à chaîne longue, joue un rôle appréciable dans la production animale intensive. Un nouveau procédé biotechnologique mis au point par LONZA permet de comparer, ce qui n'est pas fréquent, la génération de déchets par des procédés chimiques et biotechnologiques qui fournissent le même produit. La figure 2.2 présente un procédé biotechnologique beaucoup moins polluant, qui engendre environ 50 pour cent de carbone organique total en moins dans les déchets et moins de 25 pour cent des eaux usées libérées par le procédé chimique.

Les caroténoïdes servent à la pigmentation des salmonidés (saumon, truite), des poulets à rôtir et des œufs. L'industrie des aliments pour animaux emploie l'astaxanthine, la canthaxanthine, la citranaxanthine et des caroténoïdes en C₃₀. Ils sont produits par synthèse chimique ou extraits du souci (lutéine) et du poivron (capsorubine). Les principaux fabricants de caroténoïdes synthétiques sont Hoffmann-La Roche et BASF. Plusieurs procédés utilisent des algues (par exemple *Haematococcus pluvialis*) et des levures (par exemple *Phaffia*), mais les quantités disponibles sur le marché sont limitées. Il est possible de produire des pigments par voie biotechnologique à l'aide de gènes intervenant dans la synthèse des caroténoïdes isolés à partir de diverses bactéries, algues et plantes supérieures (par exemple *Rhodobacter* et *Erwinia* sp.). On estime que le marché des caroténoïdes employés dans l'alimentation animale dépassait 500 millions de dollars en 1996.

MÉTAUX ET MINÉRAUX

La biotechnologie appliquée à l'extraction minière et à la récupération des métaux repose sur deux grandes catégories de technologies : la biolixiviation et la bio-oxydation des minéraux, d'une part, et la biodépollution des sites contaminés par des métaux et leur récupération, d'autre part. Ces technologies sont abordées plus en détail à l'annexe 2.3. La comparaison entre la propreté des procédés biologiques et des méthodes classiques de récupération des métaux n'a pas été bien établie et justifierait une analyse du cycle de vie (voir le quatrième chapitre).

La biolixiviation et la bio-oxydation des minéraux sont des technologies de traitement employées à l'échelle commerciale dans le monde entier par l'industrie minière pour l'extraction des métaux communs et précieux. La biolixiviation consiste à utiliser des bactéries, principalement *Thiobacillus ferrooxidans* et *Leptospirillum ferrooxidans*, et certaines bactéries thermophiles (à haute température) afin de lixivier des métaux de valeur, comme le cuivre, le zinc et le cobalt, à partir d'un minerai sulfuré. Durant l'oxydation, la biolixiviation entraîne les particules intéressantes en solution; les résidus d'oxydation sont traités afin de maximiser la récupération des particules en solution (dans les limites de volume et de pureté de la solution imposées par les procédés en aval), et le résidu solide est rejeté.

Les exploitants d'un site de récupération du cuivre au Chili ont relevé les principaux avantages qu'ils attribuent à la biolixiviation et à la bio-oxydation des minéraux, par rapport aux technologies de traitement plus classiques, notamment les fours de grillage, les fours de fusion et les autoclaves à pression :

- pas d'émission de gaz nocifs (les fours de grillage dégagent du As₂O₃ et du SO₂, qui doivent être confinés);
- durée de construction plus courte;
- les permis d'environnement sont obtenus plus rapidement et les rapports sur l'état de l'environnement sont moins onéreux;
- pas de rejet d'effluents toxiques;
- production d'un résidu d'arséniate de fer stable dans l'environnement;

- excellente récupération des métaux;
- opération simple et sûre, le traitement s'effectuant à température et pression ambiantes;
- de plus petits projets peuvent être réalisés dans de bonnes conditions économiques et possèdent une valeur actuelle nette (VAN) plus élevée.

L'industrie de la galvanisation fournit un bon exemple de l'application de la biotechnologie à la production propre. Landskrona Galvanoverk, en Suède, a conçu un procédé biotechnologique pour le finissage des métaux en vue de remplacer le procédé traditionnel de dégraissage alcalin, qui consomme une solution d'hydroxyde de sodium à 5 pour cent et à pH 11-14. Le procédé alcalin, qui engendre un grand volume d'eaux usées contenant des métaux lourds, a été remplacé par un procédé de dégraissage enzymatique. Ce nouveau procédé a également été mis en œuvre dans deux autres entreprises de galvanisation. Les retombées sur l'environnement des procédés alcalins et enzymatiques sont indiquées sur le tableau 2.10, et les économies réalisées grâce au procédé enzymatique sur le tableau 2.11.

Tableau 2.10. **Procédés de dégraissage alcalin et enzymatique appliqués dans l'industrie de la galvanisation**

| Matière | Procédé alcalin | Procédé biotechnologique |
|-------------------|-------------------------------|--|
| Déchets | 30 tonnes de boue d'hydroxyde | 15 tonnes de boue d'hydroxyde |
| Produit de départ | 20 % d'acide sulfurique | 8 % d'acides sulfurique et chlorhydrique |
| Eau | 8 000 m ³ | 800 m ³ |

Source : Opinie, 1997.

Tableau 2.11. **Économies annuelles réalisées sur le coût du dégraissage
Comparaison entre les procédés enzymatique et alcalin**

| Catégorie | Dollars de 1990 |
|------------------------|-----------------|
| Eau | 10 800 |
| Produits chimiques | |
| - Inhibiteur | 10 100 |
| - Agent de dégraissage | 7 800 |
| - Acide sulfurique | 6 700 |
| Électricité | 7 100 |
| Entretien | 37 800 |
| Total | 80 300 |

Source : Opinie, 1997.

Le dégraissage des métaux galvanisés par un procédé enzymatique présente des avantages du point de vue de l'environnement : l'abaissement de la température du traitement, la réutilisation des tensides, le prolongement de la durée de vie des bains de dégraissage et de décapage, une diminution de la consommation d'eau et d'acides, une réduction de la production de déchets et l'amélioration de la performance du procédé. La période d'amortissement simple est estimée à cinq ans. Le procédé risque de comporter certains inconvénients, tels que la consommation de tensides ou la production d'une boue contenant des métaux, qui devront être analysés plus avant durant les premières années de l'exploitation à l'échelle industrielle.

ÉNERGIE

La biotechnologie a eu une incidence majeure sur les aspects économiques et environnementaux du secteur énergétique. Elle a amélioré l'efficacité générale des transformations, notamment du point de vue de la lutte contre la pollution. Des procédés en cours de développement, comme le biogazole,

le bio-éthanol et la biodésulfuration, visent à remplacer des systèmes plus énergivores qui engendrent des sous-produits plus nocifs. L'impact du génie génétique sur ces technologies sera important, mais il ne s'est pas encore manifesté dans toute son ampleur.

Du point de vue de la propreté et de la durabilité, les combustibles offrent une gradation continue dans les ressources énergétiques. Les sources d'énergie les plus polluantes sont le bois et les combustibles fossiles que sont le charbon et le pétrole. Les combustibles fossiles sont aussi les moins durables et les réserves de pétrole, en particulier, déclinent. Les réserves de charbon sont plus importantes, mais le charbon libère davantage de substances polluantes au cours de son extraction et de sa combustion que le pétrole. La biotechnologie permet de produire du charbon et du pétrole plus propres, essentiellement par l'élimination du soufre, et par conséquent de diminuer la charge polluante dégagée par la combustion. La production de combustibles à plus faible teneur en soufre étendra les réserves de combustibles fossiles exploitables comme sources d'énergie et abaissera le taux de polluants atmosphériques. La biotechnologie offre aussi la possibilité de fabriquer des produits équivalents aux distillats de pétrole, tels que le biogazole, ce qui pourrait contribuer à la durabilité de ce type de carburants en tant que ressources énergétiques. L'éthanol, le méthane et l'hydrogène moléculaire constituent des ressources énergétiques encore moins polluantes. La production de ces combustibles moins polluants est susceptible d'être appuyée par une production biologique associée à la conversion de l'énergie solaire. La production par voie biologique de ces sources d'énergie moins polluantes pourrait abaisser considérablement les concentrations de gaz à effet de serre (voir encadré 2.1, page 32).

L'impact de la biotechnologie sur le secteur énergétique peut s'exercer à la fois sur l'industrie des combustibles fossiles et sur celle des combustibles issus de la biomasse. Ces combustibles étant d'origine biologique, ils se prêtent particulièrement aux transformations biologiques. L'éthanol et le méthane représentent les principaux combustibles produits par voie biologique à partir de la biomasse. L'application de la biotechnologie au secteur énergétique fait l'objet d'activités de recherche-développement très dynamiques depuis plusieurs décennies. Jusqu'à une date très récente, ces applications utilisaient des souches de micro-organismes naturels, en cultures mixtes non caractérisées ou en cultures pures. Bien que la recherche ait débuté il y a plus de vingt ans, l'exploitation à grande échelle des souches modifiées génétiquement ne remonte qu'à ces cinq dernières années. Ces applications s'appuient généralement sur la maîtrise et l'amplification d'activités métaboliques particulières des bactéries, telles que la capacité de transformer les sucres en éthanol, en dioxyde de carbone ou en agents tensio-actifs, et de dégrader des composés organiques toxiques présents à l'état de traces en substances inoffensives. Ces applications, entre autres, seront illustrées plus bas par des exemples.

Sources d'énergie de remplacement

L'exemple le plus ancien de l'utilisation des « biocombustibles » est bien sûr la combustion du bois, de la tourbe, du charbon et des produits pétroliers. Les réserves ne sont pas inépuisables et des efforts ont été déployés ces dernières années pour développer des sources d'énergie renouvelables et moins polluantes à l'aide de procédés chimiques ou biotechnologiques modernes.

A l'heure actuelle, l'éthanol produit à usage de carburant à partir de la biomasse provient en majeure partie de la canne à sucre, du maïs et d'autres cultures amylacées. Les États-Unis produisent quelque 3.8 milliards de litres d'éthanol chaque année et le Brésil en fabrique probablement quatre fois plus. Ce carburant doit cependant bénéficier d'une déduction fiscale pour être compétitif. Afin d'être en mesure de concurrencer économiquement les combustibles fossiles, la technologie de la production de l'éthanol à partir de sucres tirés de la biomasse devra s'appuyer sur des cultures à faible coût et à rendement élevé et sur des méthodes plus efficaces pour la conversion des déchets lignocellulosiques en sucres fermentables. La recherche actuelle s'attelle à ces deux aspects.

Des chercheurs du ministère de l'Énergie étudient les cultures énergétiques ainsi que les espèces ligneuses et herbacées qui ont été sélectionnées pour produire des rendements élevés. Ils estiment que les États-Unis pourraient disposer de 2.5 milliards de tonnes par an de biomasse cellulosique destinée à la production de combustibles, avec un rendement potentiel en éthanol de 1.02 billion de litres. La comparaison avec la consommation annuelle de carburants aux États-Unis (253 milliards de litres d'essence et 82 milliards de litres de gazole en 1995) est encourageante.

Les scientifiques qui participent aux recherches parrainées par le ministère de l'Énergie au Laboratoire national de l'énergie renouvelable (*National Renewable Energy Laboratory* – NREL) tentent de mettre au point une procédure de conversion de la cellulose en éthanol par saccharification et fermentation simultanées. Cette procédure combine les étapes de l'hydrolyse et de la fermentation de la cellulose dans un même récipient afin de produire des rendements élevés. Les progrès accomplis par les modifications génétiques permettent aussi d'augmenter le rendement de la fermentation des sucres hémicellulosiques. L'objectif consiste à mettre au point d'ici à 2000 des technologies pour produire de l'éthanol à partir de la biomasse à un coût compétitif, sans incitations fiscales, avec celui de l'essence. Le ministère de l'Énergie indique que les études conduites jusqu'à présent ont donné lieu à des améliorations qui réduisent le coût prévu de l'éthanol issu de la biomasse de 0.95 dollar/l à 0.34 dollar/l.

Le biogazole est une source d'énergie renouvelable de remplacement qui procède de la désestérification et de la méthylation de l'huile de soja ou de colza. Il est déjà produit à l'échelle commerciale en petites quantités en Europe et au Japon, avec l'aide de subventions importantes des pouvoirs publics. Son coût élevé, excédant souvent 0.80 dollar/l, l'empêche de concurrencer à l'heure actuelle les carburants pétroliers. Le NREL étudie des sources bon marché de biogazole, telles que la graisse recyclée des restaurants et les graisses non comestibles des déchets d'abattoir. Il est cependant peu probable que le biogazole réponde un jour à un large part de la demande en gazole. A titre d'exemple, la totalité du soja récolté aux États-Unis en 1995, soit une superficie arable d'environ 120 millions d'hectares, aurait produit 11 milliards de litres de biogazole, ce qui répond à 13 pour cent seulement de la demande totale de gazole. Des informations sur le biogazole peuvent être consultées sur le site Web du *National Biodiesel Board* (<http://www.biodiesel.org>).

La bioconversion du gaz de synthèse en carburants liquides tels que l'éthanol est aussi étudiée. Le gaz de synthèse est un mélange de CO, H₂ et CO₂ résultant de l'oxydation partielle d'un corps carboné quelconque. Les produits de départ de la fabrication du gaz de synthèse comprennent des déchets agricoles, municipaux et de papier, du charbon, du gaz naturel ou une biomasse cultivée à cette fin. La variété des produits de départ de la synthèse du gaz en fait une source de carburants particulièrement universelle. Les carburants issus du gaz de synthèse, qui pourraient voir leur coût de production abaissé et leur rendement en carbone augmenté, représentent un substitut intéressant aux carburants obtenus par fermentation des sucres de la biomasse. Il existe aussi des procédés chimiques du type Fisher-Tropsch pour convertir le gaz de synthèse en produits chimiques et en hydrocarbures de la catégorie des carburants. Cette technologie indirecte demande des rapports H₂/CO très précis ainsi que des températures et pressions élevées (225-365 °C, 2.5 MPa); en outre, les gaz soufrés à une concentration supérieure à 0.1 ppm compromettent son efficacité. La bioconversion du gaz de synthèse, en revanche, ne requiert ni purification des gaz, ni températures et pressions élevées.

La recherche appuyée par le ministère de l'Énergie, la *National Science Foundation* (Fondation nationale pour la science), les instituts de recherche sur l'énergie électrique et le gaz (*Electric Power Research Institute, Gas Research Institute*) et d'autres organismes a amélioré la compréhension et la productivité de la production biologique de carburants et de substances chimiques à partir du gaz de synthèse. L'efficacité du procédé biologique a été prouvée et des temps de séjour de quelques minutes ont été obtenus pour la conversion pratiquement complète du H₂ et du CO. Des études préliminaires de l'Office des technologies industrielles du ministère de l'Énergie ont montré qu'il était possible de produire du méthanol pour moins de 0.10 dollar/l.

Le coût élevé de la production à grande échelle du biogaz (méthane plus CO₂), comparé à celui d'autres sources de combustible, est le principal facteur qui limite l'introduction du biogaz comme source d'énergie de remplacement pour l'industrie et la production d'électricité. La production de biogaz et d'alcool est plus onéreuse que les sources d'énergie non renouvelables. Bien que le coût de la production du biogaz ne soit pas aussi élevé que celui de l'alcool, la qualité de combustion du biogaz est inférieure à celle d'autres sources d'énergie.

Spelman (1994) indique que le coût des matières premières agricoles est trop élevé pour remplacer les produits dérivés du pétrole. La tendance profonde de l'économie est toutefois en faveur de l'agriculture : le prix du pétrole finira par augmenter tandis que les matières premières agricoles sont

renouvelables et en train de devenir progressivement moins chères que le pétrole. Par exemple, en 1990, une tonne de pétrole aurait permis d'acheter quatre fois plus de blé qu'en 1967.

Biodésulfuration

La désulfuration des combustibles fossiles par les micro-organismes fait l'objet de recherches actives depuis 60 ans pour deux raisons. La première se rapporte à la connaissance du devenir de ces molécules dans l'environnement, étant donné qu'elles représentent une composante importante et difficile à maîtriser des déversements de pétrole brut. La deuxième a trait à la mise au point de procédés permettant d'éliminer le soufre du charbon, du pétrole brut et des distillats de pétrole avant la combustion.

Le soufre des combustibles fossiles doit être enlevé parce que la combustion des molécules soufrées présentes dans les produits du charbon et du pétrole dégage des oxydes de soufre. Ces composés corrosifs sont à l'origine des pluies acides et ont une incidence sensible sur l'environnement de la planète. La biodésulfuration vise à remplacer un procédé existant (l'hydrosulfuration) qui coûte cher, consomme beaucoup d'énergie et se prête relativement mal à la désulfuration en profondeur du combustible, alors que celle-ci s'imposera de plus en plus à mesure que le pétrole brut à faible teneur en soufre se raréfie et que les réglementations deviennent plus sévères. La présence indésirable de soufre dans les combustibles fossiles a déjà entraîné l'adoption de réglementations de plus en plus strictes sur la teneur en soufre des carburants dans le monde entier (tableau 2.12).

Tableau 2.12. **Réglementations récentes et futures sur le soufre**

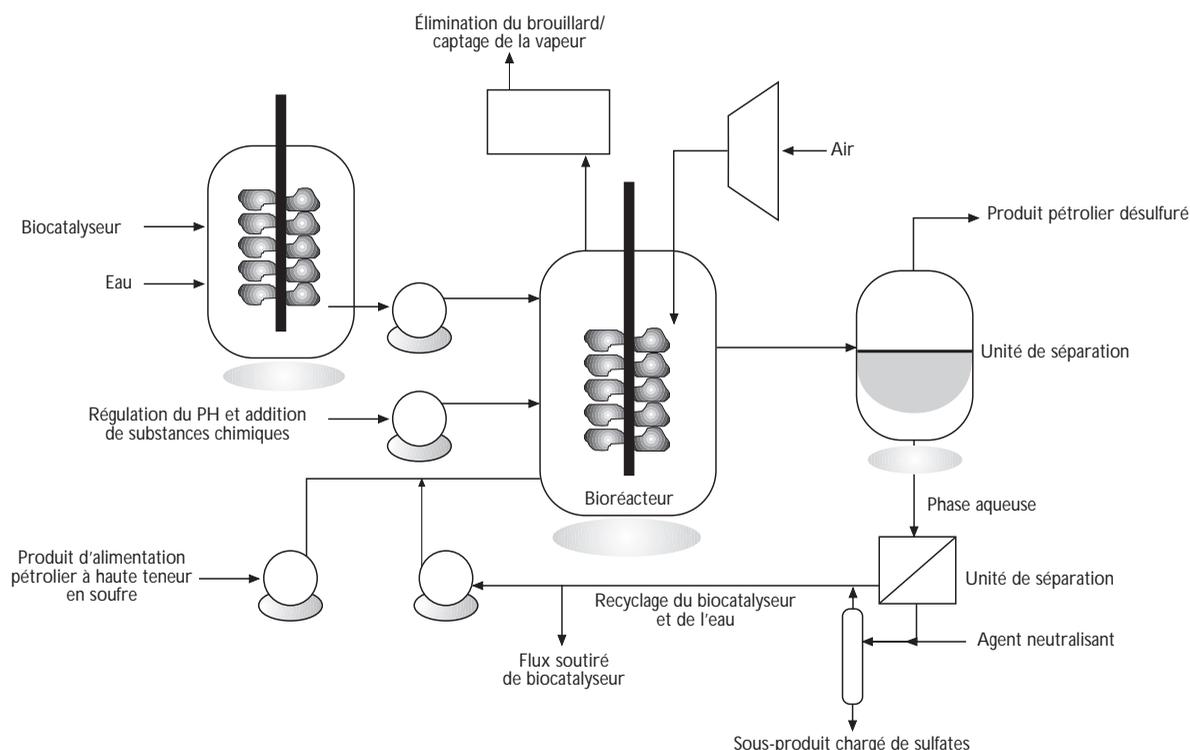
Teneurs en soufre (ppm)

| Année | Pays et carburant | Actuelles | Visées |
|-------|---|-----------|--------|
| 1993 | États-Unis – gazole routier | 2 500 | 500 |
| 1996 | Singapour – gazole | 5 000 | 2 500 |
| | Inde – gazole | 8 000 | 5 000 |
| | Union européenne – gazole | 3 000 | 500 |
| 1997 | Japon – gazole | 2 000 | 500 |
| 1998 | Taipei chinois – gazole | 5 000 | 500 |
| 1999 | Union européenne – mazout | 3 500 | 1 000 |
| | Union européenne – soutes | 33 000 | 10 000 |
| 2000 | Corée – gazole | 2 000 | 500 |
| | Thaïlande – gazole | 5 000 | 500 |
| | Union européenne – gazole | 500 | 350 |
| | États-Unis – essence répondant aux normes du CAAA (Clean Air Act Amendment) | 400 | 50-100 |
| | Union européenne – essence | 500 | 350 |
| 2005 | Union européenne – gazole | 350 | < 100 |

La biodésulfuration du pétrole brut et de ses fractions (essence, gazole, etc.) fait appel à des micro-organismes qui possèdent un métabolisme leur permettant de transformer les atomes de soufre des combustibles en produits solubles dans l'eau qui peuvent ensuite être extraits du pétrole. Les enzymes de ce système métabolique ont été isolées et identifiées, et leurs gènes correspondants clonés et amplifiés dans de nouvelles souches de micro-organismes hôtes. Les nouveaux organismes ont été modifiés génétiquement en vue d'exprimer une activité de désulfuration 100 fois supérieure à celle de l'isolat naturel.

Le schéma d'application de ces biocatalyseurs est illustré par la figure 2.3. Les bactéries sont produites dans des enceintes de fermentation classiques, puis introduites dans le réacteur de désulfuration d'une raffinerie, par exemple. Dans le réacteur, les bactéries métabolisent les hydrocarbures soufrés et libèrent des produits soufrés solubles dans l'eau. Ceux-ci sont ensuite extraits en phase aqueuse. A l'issue de la réaction, les phases sont séparées et le pétrole désulfuré est récupéré pour subir d'autres traitements. Le biocatalyseur et l'eau sont recyclés afin d'être réutilisés dans le réacteur. Un flux d'eau usée et de catalyseur épuisé est évacué en continu du réacteur pour être remplacé par une arrivée d'eau et de catalyseur frais. L'eau chargée en sulfates peut alors être traitée dans la raffinerie et éliminée par des moyens classiques.

◆ Figure 2.3. *Procédé de désulfuration biocatalytique*



Source : Energy BioSystems Corporation.

L'application de cette technologie est en train de passer à l'échelle commerciale. La plus grande unité en activité à l'heure actuelle est exploitée à l'échelle pilote par Energy BioSystems Corporation aux États-Unis, avec un débit de cinq barils par jour. Ils prévoient de commercialiser cette technologie dans les prochaines années pour le gazole et dans trois à cinq ans pour le pétrole brut. Ce procédé, qui représente l'application la plus importante de la biotechnologie dans le secteur énergétique, est à même de rivaliser avec la production d'éthanol et d'avoir un impact sensible sur les aspects économiques du traitement des combustibles. A l'instar de la production d'éthanol, toutefois, il devra concurrencer les solutions existantes et relever des défis économiques de grande envergure avant d'être appliqué à grande échelle.

Récupération assistée du pétrole

Le recours à la biotechnologie pour récupérer une quantité supplémentaire de pétrole brut dans les formations souterraines fait l'objet de travaux de R-D et d'applications sur le terrain depuis au moins 30 ans. Cela permet dans certain cas d'améliorer les caractéristiques écologiques du procédé d'extraction. Trois grandes applications sont utilisées avec succès. La première consiste à employer des « biosurfactants » produits par des bactéries qui dégradent le pétrole. Ces bactéries s'obtiennent par des méthodes de fermentation normalisées dans des conditions qui provoquent chez elles la sécrétion d'agents tensio-actifs, qui peuvent ensuite être injectés dans des formations de pétrole brut. Là, ces agents solubilisent le pétrole résiduel qui n'a pas été entraîné par l'opération initiale de pompage, en améliorant ainsi la récupération à partir du puits de pétrole. De même, certaines bactéries produisent des polymères, tels que la gomme de xanthane, capables de moduler la viscosité des solutions d'injection lors de la récupération secondaire du pétrole. Des souches modifiées de *Xanthomonas campestris* qui fabriquent des variétés de gomme dotées de propriétés différentes ont été étudiées, mais ne sont pas commercialisées.

Des bactéries ou des produits bactériens sont également employés en vue de modifier la formation même. Dans ce cas, les bactéries sont injectées dans le puits où elles se développent. Par suite, elles dégagent du dioxyde de carbone qui remet la formation sous pression et pousse une quantité supplémentaire de pétrole vers la sortie du puits. Les bactéries ou les polymères qu'elles produisent sont aussi utilisés pour obstruer une formation afin de diriger le flux de pétrole dans la direction voulue.

Le déparaffinage par les micro-organismes est un autre exemple de l'utilisation de ces derniers pour augmenter la quantité de pétrole brut extraite. Dans ce cas, des micro-organismes particuliers, et éventuellement quelques nutriments, sont injectés dans le puits où ils prolifèrent aux dépens de certains composants du pétrole. Ces bactéries qui dégradent des hydrocarbures sont capables de métaboliser des alcanes à longue chaîne (cires), ce qui abaisse la viscosité du pétrole et augmente le débit du pétrole à la sortie du puits.

Si l'extraction du pétrole améliorée par les micro-organismes est pratiquée dans le monde entier, ce n'est pas une science exacte compte tenu de la diversité des paramètres qui gouvernent les différents gisements de pétrole brut et le pétrole lui-même, et des mécanismes bactériens encore mal compris.

Encadré 2.8. Les procédés industriels non polluants devraient être encouragés

On pourrait supposer que la réduction des quantités de matières premières, de la consommation d'énergie et du volume des déchets conduit de façon tellement évidente à un abaissement des coûts que n'importe quel procédé répondant à ces objectifs trouverait immédiatement une application industrielle. Pourtant, seul un petit nombre de ces procédés sont exploités, et ce pour des raisons compréhensibles : les dépenses en capital et les coûts de mise au point associés aux procédés innovants dépassent souvent la diminution des frais d'exploitation. A titre d'exemple, l'ampleur de la récupération de matériaux à valeur ajoutée dans les déchets risque d'être si faible et le coût des procédés en aval si élevé que ce traitement n'est pas rentable dans sa globalité, même lorsque les matières premières sont « gratuites ». Il faut tenir compte du fait qu'une installation de traitement classique est construite en vue d'être exploitée durant de nombreuses décennies et que la réduction des coûts associée à un nouveau procédé doit se solder par un bilan positif en comparaison avec le coût peu élevé d'une installation totalement amortie.

La deuxième raison pour laquelle on hésite à introduire une nouvelle méthode est la difficulté de l'intégrer dans un procédé existant à plusieurs étapes. L'industrie pharmaceutique, par exemple, doit faire homologuer non seulement le produit fini par les autorités avant sa mise sur le marché, mais également la totalité du procédé de fabrication. Toute modification apportée à ce dernier impose donc une nouvelle homologation. Ce n'est que lorsqu'un nouveau procédé est facile à intégrer, comme dans le cas de la fabrication de résine résistante à l'état humide (voir le troisième chapitre) qu'il est aisément accepté.

La troisième raison qui ralentit la pénétration des procédés biologiques relève davantage de la sociologie. La formation traditionnelle des ingénieurs chimistes et des concepteurs d'installations chimiques ne couvre pas les processus biologiques. La nature des matériaux, les récipients et les conditions d'exploitation sont si différents que les ingénieurs et les exploitants des installations doivent se recycler complètement et risquent donc de se sentir beaucoup moins à l'aise qu'avec les éléments de procédés qui leur sont familiers.

Lorsque les avantages économiques sont écrasants, comme dans le cas d'une adoption rapide, il n'est pas nécessaire de persuader davantage l'industrie. Les pouvoirs publics pourraient cependant avoir un rôle à jouer au niveau des premiers obstacles à l'acceptation d'une nouvelle technologie. Ce rôle relèvera en partie de la sensibilisation ; il s'agira d'informer les dirigeants des industries, de recycler le personnel d'exploitation et de promouvoir les avantages auprès du grand public. Il pourra aussi englober des actions économiques, consistant à accorder un avantage sélectif à court ou à moyen terme à la nouvelle technologie par le biais du système fiscal ou à encourager financièrement des projets de démonstration concernant de nouveaux produits et procédés. Un troisième rôle touche plus directement à la réglementation, par exemple lorsque celle-ci impose à l'industrie d'adopter des technologies plus propres pour améliorer ses résultats en matière d'environnement, indépendamment de la hausse de coût initiale.

BIBLIOGRAPHIE

- ABBOTT, G. (éd.) (1996), «Biotechnology Industry Study Report 1996», dans *In Touch with Industry: ICAF Industry Studies, Academic Year 1996*, Industrial College of the Armed Forces National Defense University, Washington, DC.
- ACHILLADELIS, B. (1993), «The Dynamics of Technological Innovation: The Sector of Antibacterial Medicines», *Research Policy*, vol. 22, pp. 279-308, North-Holland.
- BALLANTINE, B. et S. THOMAS (1997), *Benchmarking the Competitiveness of Biotechnology in Europe*, The European Association for Bioindustries, Bruxelles, Belgique.
- BICKERSTAFF, G.F. (1995), «Impact of Genetic Technology on Enzyme Technology», *The Genetic Engineer and Biotechnologist*, vol. 15:1, Journals Oxford Ltd.
- BIJMAN, J. (1995), «Strategies of US Biotechnology Companies», *Biotechnology and Development Monitor*, n° 24, pp. 13-16, Amsterdam.
- BRUCE, J. (1996), «Automated System Rapidly Identifies and Characterizes Micro-organisms in Food», *Food Technology* 50:1, pp. 77-81.
- BRUGGINK, A. (1996), «Biocatalysis and Process Integration in the Synthesis of Semi-synthetic Antibiotics: Biotechnology for Industrial Production of Fine Chemicals», *Chimia*, vol. 50, pp. 431-432.
- BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT (BUNR) (1996), *Umweltpolitik: Tagungsband des Fachgesprächs, «Beitrag der Biotechnologie zu einer nachhaltigen, umweltgerechten Entwicklung»*, Bonn, 17 décembre.
- DEGENAARS, G.H. et F.H.A. JANSZEN (1996), *Modern Biotechnology within the Dutch Industry: Critical Factors for Success*, Erasmus University Rotterdam, ministère des Affaires économiques, Pays-Bas.
- FLEURENT, J. et al. (1997), «Rapid Genetic Identification of Indigenous Yeast Species Found in Grape Must or Wine», American Society for Enology and Viticulture Annual Meeting, San Diego, Californie.
- FREUND, S.M. et al. (1997), «Use of Ribotyping to Monitor Lactic Acid Cultures within a Fermentation», Institute for Food Technologists Annual Meeting, Orlando, Floride.
- GODFREY, T. et S. WEST (1996), *Industrial Enzymology*, 2^e édition, Macmillan/Nature, Royaume-Uni.
- HANG, Y. et E. WOODAMS (1997), «Corncobs: A Novel Substrate for Microbial Production of Citric Acid», Institute for Food Technologists Annual Meeting, Orlando, Floride.
- KRAUSE, M. et H. NAYBERG (1997), «Genetically-Modified Micro-organisms in the Environment», *Aktuelt Miljø*, février.
- KUMAR, A., C. PURTELL, et M.Y. YOON (1996), *Book of Papers, The Textile Institute's 77th World Conference*, 22-23 mai, vol. 1:2, p. 177.
- MARYANSKI, J.H. (1995), «The FDA's Policy for Foods Developed by Biotechnology», dans Engle et al. (éd.), *Genetically Modified Foods: Safety Issues*, Chapter 2, pp. 12-22, American Chemical Society, Symposium Series n° 605.
- McCARDELL, A. et al. (1996), «Genetic Characterization and Identification of Lactic Acid Bacteria Using the Riboprinter Microbial Characterization System», American Society for Microbiology 96th General Meeting, Nouvelle-Orléans, Louisiane.
- McNULTY, T.P. et D.L. THOMPSON (1990), «Economics of Bioleaching», dans H.L. Ehrlich et C.L. Brierley (éd.), *Environmental Biotechnology: Microbial Mineral Recovery*, McGraw-Hill, New York.
- NOVO NORDISK A/S (1996), *Annual Report 95*, Bagsvaerd, Danemark.
- NOVO NORDISK A/S (1997), *Annual Report 96*, Bagsvaerd, Danemark.
- OCDE (1996), *La base de données STAN de l'OCDE pour l'analyse de l'industrie : 1975-1994*, OCDE, Paris.

- OPINIE (1997), «Biotech rekt zichzelf rijk», *Chemisch Weekblad*, vol. 34, 23 août.
- PINA, C.M.G. et al. (1997), «Diversity of Lactic Acid Bacteria and Yeast Isolated during the Spontaneous Fermentation of Grape Pomace», Institute for Food Technologists Annual Meeting, Orlando, Floride.
- PLINE, *Histoire naturelle*, XVII, 51, et XXIII, 140.
- ROHM, O. (1908), Brevet allemand 200, 519.
- SHELDON, R.A. (1997), «Catalysis and Pollution Prevention», *Chemistry and Industry*, 6 janvier, pp. 12-15.
- SMITH, J. (éd.) (1996), *L'avenir de la biotechnologie en Europe – De la recherche-développement à la compétitivité de l'industrie*, Club de Bruxelles, contribution à la conférence organisée par le Club de Bruxelles les 26 et 27 septembre 1996, à Bruxelles, Belgique.
- SPELMAN, C.A. (1994), *Non-Food Uses of Agricultural Raw Materials: Economics, Biotechnology and Politics*, CAB International, Cambridge.
- TAYLOR, M.M., D.G. BAILEY et S.H. FEAIRHELLER (1987), *J. Amer. Leather Chemists Assoc.* 82, p. 153.
- TME (1994), *Biotechnology for Cleaner Production: Case Studies of Some Applications*, Université d'Utrecht, Pays-Bas, Rapport 4909.
- US CONGRESS, OFFICE OF TECHNOLOGY ASSESSMENT (OTA) (1991), *Biotechnology in a Global Economy*, OTA-BA-494, US Government Printing Office, Washington, DC.
- ZHENG, A. et K. SHETTY (1997), «Development of Value-Added Fungal Bioinoculants Using Cranberry Processing Waste», Institute for Food Technologists Annual Meeting, Orlando, Floride.

PUBLICATIONS CONSULTÉES

- AVRAMOVIC, M. (1996), *An Affordable Development? Biotechnology, Economics and the Implications for the Third World*, Zed Books, Londres et New Jersey.
- COMMISSION EUROPÉENNE (1995), *Panorama de l'industrie communautaire 95/96*, Office des publications officielles des Communautés européennes, Bruxelles, Luxembourg.
- COWAN, D.A. (1991) « Industrial Enzymes », dans V. Moses et R.E. Cape (éd.), *Biotechnology: The Science and The Business*, Harwood Academic Publishers.
- CRAMER, J. (1997), *Communication personnelle*, TNO-STB, Pays-Bas.
- DECIMA RESEARCH (1996), *Report to the Canadian Institute of Biotechnology on Attitudes towards Biotechnology*, Decima Research, Ottawa.
- ERIKSSON, K.E. (éd.) (1997), *Advances in Biochemical Engineering Biotechnology*, Springer-Verlag, Berlin et Heidelberg.
- FAGAN, J. (1997), « Tomato or Tomáto: Genetic Engineering and the Natural Foods Industry », National Nutritional Foods Association Annual National Convention et Trade Show, Las Vegas, Nevada.
- FAO (Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture) (1996), Joint FAO/WHO Expert Consultation on Biotechnology and Food Safety, Rome.
- FINNERTY, W.R. (1992), « Microbial Enhanced Oil Recovery », *Genetic Engineering and Biotechnology Monitor*, n° 38, pp. 36-43.
- HALLMAN, W. et J. METCALFE (1993), *Public Perceptions of Agricultural Biotechnology: A survey of New Jersey residents*, Cook College, New Brunswick, New Jersey.
- HOBAN, T. (1996a), « How Japanese Consumers View Biotechnology », *Food Technology* 50:7, pp. 85-88.
- HOBAN, T. (1996b), « Trends in Consumer Acceptance and Awareness of Biotechnology », *Journal of Food Distribution Research* 27:1, pp. 1-10.
- HOBAN, T. (1997), « Consumer Acceptance of Biotechnology: An International Perspective », *Nature Biotechnology* 15:3, pp. 232-234.
- IFT (Institute of Food Technologists) OFFICE OF SCIENTIFIC PUBLIC AFFAIRS (1992), « Biotechnology Applied to Foods », *Food Technology* 46:9, pp. 30-43.
- JEFFRIES, T.W. et L. VIHKARI (éd.) (1996), *Enzymes for Pulp and Paper Processing*, ACS Symposium Series 655, American Chemical Society, Washington, DC.
- MACER, D. (1990), *Attitudes to Genetic Engineering, Japanese and International Comparisons*, Eubios Ethics Institute, Christchurch.
- Mat. Res. Soc. Symp. Proc.* (1990), vol. 174, p. 267.
- MEYER, A., H.P. KIENER, R. IMWINKELRIED, et N. SHAW, 100 Years Progress with LONZA.
- MINISTÈRE DES AFFAIRES ÉCONOMIQUES (1994), *Milieu in de Markt: Internationale Markten, Fase 1*, Arthur D. Little International, Inc.
- Modern Plastics* (1997), vol 74:1, p. 7.
- MÜLLER, A., G. RUSSELL, et P. LUCAS (1997), *European Biotech 97: "A New Economy"*, Ernst et Young International, Stuttgart.
- NOVO NORDISK A/S (1995), *Environmental Report*, Bagsvaerd, Danemark.
- NOVO NORDISK A/S (1996), *Environmental Report*, Bagsvaerd, Danemark.
- Textile Magazine* (1993), Issue n° 3.
- THAYER, A.M. (1997), *Chem. et Engin. News*, 28 avril.
- UNIVERSITÉ D'UTRECHT, Pays-Bas, Rapport 4904.
- VOEFFRAY, R., J.C. PERLBERGER, L. TENUD, et J. GOSTELLI (1987), *J. Helv. Chim. Acta*, vol. 70, p. 2058.
- YOUNG, R.A. et M. AKTAR (éd.) (1997), *Environmentally Friendly Technologies for the Pulp and Paper Industry*, John Wiley et Sons, Inc., New York.

TENDANCES ET PERSPECTIVES SCIENTIFIQUES ET TECHNOLOGIQUES*

- Le développement des produits et procédés propres est influencé par la demande du public, les forces du marché et la faisabilité scientifique et technologique.
- Parmi les découvertes scientifiques et technologiques récentes qui offrent les meilleures perspectives de mise au point de produits et procédés biotechnologiques propres figurent les biocatalyseurs nouveaux ou améliorés, les systèmes exploitant des cultures mixtes de micro-organismes, l'ingénierie des voies métaboliques et la bioinformatique.
- L'introduction de la biotechnologie dans de nombreux procédés industriels dépendra de plus en plus de la mise au point de biocatalyseurs issus d'une recombinaison.
- L'ingénierie du traitement par voie biologique et le traitement biologique intégré représentent aussi des facteurs déterminants pour la commercialisation de la biotechnologie.
- Pour accroître la pénétration de la biotechnologie dans l'industrie, il faudra surmonter plusieurs obstacles techniques grâce à des travaux de R-D.
- Les projets de démonstration sont essentiels pour jeter un pont entre la recherche biotechnologique en laboratoire et l'application industrielle.

INTRODUCTION

Ainsi que nous l'avons clairement montré dans les chapitres précédents, la biotechnologie contribue déjà à la production propre dans de nombreux secteurs industriels. Le présent chapitre donne d'abord une estimation des tendances à court terme sur ce marché et précise quelle sera la part de la biotechnologie propre dans les différents secteurs durant la prochaine décennie. Les prévisions de marché indiquent qu'il est nécessaire de résoudre les problèmes techniques et autres qui freinent l'expansion de la biotechnologie pour des produits et procédés propres. Aussi le présent chapitre couvre-t-il ces questions ainsi que les opportunités qui se dégagent de l'évolution technique.

Entre 1995 et 2000, les ventes associées à la biotechnologie devraient doubler pour atteindre quelque 35 milliards de dollars dans le domaine de la santé humaine et animale et avoisiner les 18 milliards de dollars dans le secteur alimentaire. Les fabricants de matériel et de produits de diagnostic prévoient que le chiffre actuel de 8-9 milliards de dollars passera à environ 20 milliards de dollars d'ici à la fin de la décennie. En ce qui concerne les produits chimiques, on s'attend à une progression encore plus spectaculaire, de quelque 5 milliards de dollars à quelque 15 milliards de dollars au cours de la même période (Smith, 1996).

Le tableau 3.1 reproduit les estimations actuelles et les projections à l'horizon 2005 de la part de l'ensemble des VAB (ventes associées à la biotechnologie – pour les définitions, se reporter aux premier et deuxième chapitres) dans certains secteurs à l'échelle mondiale. Les prévisions s'appuient essentiellement sur les études de marché concernant les enzymes. Certains spécialistes prévoient que les ventes de produits augmenteront en moyenne de 19 pour cent par an entre 1996 et 2006 dans des secteurs spécialisés de la biotechnologie, notamment les enzymes industrielles.

* Ce chapitre a été rédigé sous la responsabilité du Dr R. Kurane, Institut national de la bioscience et de la technologie humaine, Agence de la science et technologie industrielle, ministère des Échanges et de l'Industrie (MITI), Japon.

Tableau 3.1. **Part de marché de la biotechnologie (VAB) dans certains secteurs à l'échelle mondiale**

VAB totales en pourcentage de la valeur marchande totale des produits

| Secteur | 1996 | Projection à l'horizon 2005 |
|--------------------------------------|--------|-----------------------------|
| Produits chimiques ¹ | < 1 % | < 1 % |
| Produits pharmaceutiques/chimie fine | 5-11 % | 10-22 % |
| Pâtes et papiers | 5 % | 35 % |
| Alimentation | 1-2 % | 2-4 % |
| Textiles | < 1 % | < 1 % |
| Cuir | < 1 % | < 1 % |
| Énergie | < 1 % | < 1 % |

1. A l'exception des produits pharmaceutiques (médicaments et autres produits à usage médical).

Source : Compilé et adapté à partir de diverses sources.

Le marché des enzymes et sa croissance prévue dans différents secteurs peut fournir également des indications sur le potentiel de croissance de la biotechnologie (tableau 3.2). Ces données montrent que l'impact de la biotechnologie pourrait doubler dans les prochaines années.

Tableau 3.2. **Estimation des tendances du marché des enzymes industrielles (États-Unis et Europe), 1995-2000**

Millions de dollars

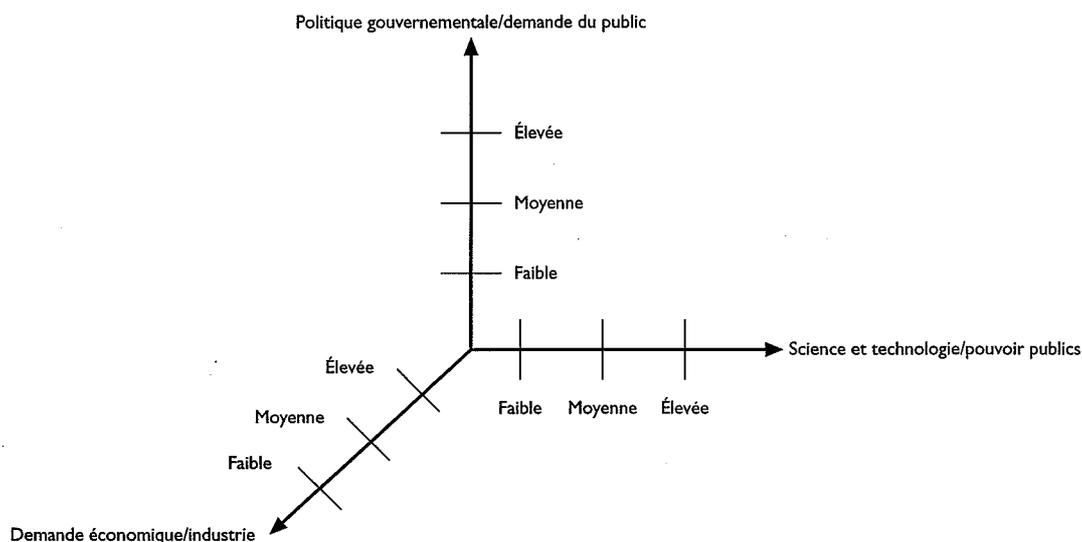
| Secteur | 1995 | 2000 |
|--------------|------|-------|
| Détergents | 280 | 400 |
| Alimentation | 240 | 370 |
| Boissons | 200 | 320 |
| Autres | 160 | 320 |
| Total | 880 | 1 410 |

Source : Bickerstaff, 1995.

Afin de cerner les possibilités de développer des produits et procédés respectueux de l'environnement et les domaines de recherche à approfondir, il est nécessaire d'étudier la demande du public, la demande économique (forces du marché) ainsi que la faisabilité scientifique et technologique. Ces trois paramètres peuvent être considérés comme représentatifs des trois principales parties prenantes, à savoir le grand public, l'industrie et les pouvoirs publics. Une pondération variable pourra être attribuée à chacun de ces trois paramètres selon la partie prenante, ainsi que l'illustrent les axes de la figure 3.1. Les priorités (pondérations) relatives à ces paramètres varieront d'un pays à l'autre. L'industrie est susceptible d'accorder une importance particulière aux coûts et pourrait, par exemple, être favorable à l'incorporation d'une nouvelle étape dans un procédé existant, ce qui lui éviterait de financer la conception et l'acquisition d'un procédé entièrement nouveau.

Induire un changement d'attitude auprès de la population et des pouvoirs publics à l'égard de l'environnement et de l'utilité potentielle des progrès de la R-D offrirait de nombreuses possibilités d'introduire des produits et procédés « verts ». Les goulets d'étranglement scientifiques et technologiques qui entravent le développement de nouveaux produits et procédés biotechnologiques doivent aussi être pris en considération au moment d'évaluer ces possibilités.

Il est impossible, dans un rapport tel que celui-ci d'exposer en détail la science fondamentale qui sous-tend les innovations biotechnologiques. Il est difficile d'isoler les aspects de la R-D qui se rapportent exclusivement aux produits et procédés plus propres, étant donné que la majorité des recherches décrites dans ce chapitre, notamment dans des domaines de pointe tels que l'étude du

◆ Figure 3.1. **Forces agissantes et parties prenantes dans la technologie propre**

Source : R. Kurane.

génomique et l'informatique, font progresser tous les secteurs de la biotechnologie, de la médecine à l'agriculture. Nous avons choisi des exemples représentatifs pour illustrer ces domaines, même s'ils débordent parfois du cadre de la technologie non polluante.

Si les auteurs du présent rapport se sont efforcés de mettre en relief les relations entre la biotechnologie et d'autres procédés physico-chimiques et de faire ressortir que la biotechnologie n'est que l'une des composantes d'une batterie de techniques permettant d'obtenir des produits et procédés industriels propres (voir aussi le premier chapitre), la biotechnologie est désormais tellement polyvalente qu'il est raisonnable, lorsqu'on identifie les problèmes ou les obstacles à de nouveaux progrès, de rechercher des solutions biotechnologiques.

GOULETS D'ÉTRANGLEMENT ET BESOINS DU MARCHÉ NON SATISFAITS

Les entraves à l'utilisation de la biotechnologie peuvent être de nature technique, lorsque les connaissances scientifiques sont insuffisantes, ou sociologique, s'il y a lieu de faire évoluer les attitudes du public ou des industriels.

Plusieurs facteurs ont eu tendance à limiter la pénétration de la biotechnologie pour des procédés industriels non polluants. Ces facteurs, qui comprennent la faisabilité technique (tableau 3.3) et la démonstration de procédés et de produits (tableaux 3.4 et 3.5), servent de base à la définition des besoins en matière de R-D. L'identification et la résorption de ces goulets d'étranglement augmentera la pénétration sur le marché. Ici, la R-D est considérée du point de vue des besoins du marché plutôt que de l'impulsion technologique.

Parmi les obstacles techniques à l'application des biocatalyseurs classiques aux procédés industriels figurent leur caractère hydrophile et leur inactivation à haute température. Dans l'industrie pétrochimique, la plupart des intermédiaires sont insolubles dans l'eau, si bien qu'actuellement les réactions doivent être menées dans des solvants organiques. Les procédés biologiques soulèvent d'autres problèmes tels que la consommation d'une grande quantité d'eau, la complexité des installations dans lesquelles se déroule le procédé et de faibles rendements dus en partie à notre connaissance incomplète des voies métaboliques et des mécanismes de régulation physiologique.

Tableau 3.3. **Obstacles techniques à l'application à plus grande échelle de la biotechnologie dans l'industrie**

| Secteur industriel | Obstacles techniques | Progrès et solutions possibles |
|--|--|---|
| Produits chimiques | | |
| - Produits de base | Conditions de réaction (température, solvants) | Biodiversité (prospection et découverte) Ingénierie des protéines |
| - Plastiques, polymères | Persistance Propriétés d'emploi | Biopolymères biodégradables Synthèse/modification d'enzymes |
| - Produits pharmaceutiques | Rythme de découverte Coûts de fabrication | Bioinformatique Biodiversité/prospection ciblée Chimie/biochimie combinatoires Composés du plomb dérivés de substances artificielles |
| Pâtes et papiers | Enlèvement de la lignine Recyclage des déchets Modification chimique | Bioblanchiment Arbres transgéniques Recyclage des « fines » de la pâte Enlèvement des sous-produits |
| Textiles et cuir | Tissage et teinture chimiques Transformations conduites en milieu acide et alcalin | Enzymes Extrémophiles |
| Alimentation humaine et animale | Maintien de conditions stériles | Organismes thermophiles Extrémozymes |
| Métaux et minéraux | Toxicité des métaux Vitesses de transformation Gestion des déchets | Biodiversité Modification génétique |
| Énergie | Combustibles fossiles de qualité médiocre Récupération Durabilité Superficie requise pour cultiver les matières premières des biocombustibles | Biodésulfuration Récupération assistée du pétrole Fabrication d'hydrogène |

 Tableau 3.4. **Procédés biologiques innovants : efforts de R-D et obstacles rencontrés**

| Éléments de procédés | Goulets d'étranglement | Progrès et solutions possibles |
|---|---|--|
| Biocatalyse | Vulnérabilité aux solvants organiques, à la chaleur, aux acides, aux bases, à la pression, aux substrats hydrophiles toxiques Propriétés catalytiques : demi-vie courte, trop grande spécificité, chiralité Réactions en plusieurs étapes Innovation : on manque de biocatalyseurs analogues aux catalyseurs chimiques | Extrémophiles, prospection et découverte de la biodiversité, immobilisation des biocatalyseurs Évolution dirigée, ingénierie des protéines, conditions de réaction Procédés à base de cultures mixtes, ingénierie des voies métaboliques Enzymes hybrides, ribozymes, abzymes |
| Ingénierie du traitement par voie biologique | Surveillance/régulation Systèmes microaqueux Concentrations élevées et faibles de réactifs Conception de bioréacteurs pour la culture de cellules animales et végétales | Biocapteurs, régulation en logique floue (réseaux neuraux artificiels) Réacteurs à membrane Intensification du procédé, mise au point de biocatalyseurs Maîtrise de l'apoptose, de l'élicitation, de la transmission d'un signal |

Tableau 3.5. **Obstacles à la mise au point de nouveaux bioproduits**

| Produits innovants | Obstacles | Progrès et solutions possibles |
|--|---|--|
| Produits « verts » : plastiques et polymères biodégradables, biocombustibles | Ressources renouvelables, combustibles fossiles bon marché, accroissement d'échelle | Biomatériaux et biocombustibles destinés à remplacer les produits pétrochimiques |
| Produits recyclés | Déchets organiques dilués, déchets rebelles au traitement | Produits à valeur ajoutée |
| Produits de substitution : dispositifs micro-électronique | R-D | Nanomachines |
| | Accroissement de l'échelle de production | Biopuces |
| Produits phytosanitaires | Résistance, spécificité et persistance | Biopesticides, activateurs de croissance végétale |
| Biomatériaux - Inorganiques (magnétiques, composites, architectures complexes) - Organiques (fil d'araignée) | Épuisement des ressources naturelles, mise au point de procédés biologiques | Biomimétisme, matrices biomoléculaires |
| | Production industrielle | Technologie de la fermentation, technologie de l'ADN recombiné |

Le manque de connaissances fondamentales sur la physiologie des micro-organismes constitue une autre entrave majeure, mise en évidence dans le premier rapport de l'OCDE sur la biotechnologie (Bull *et al.*, 1982). Si cette constatation s'applique aux cultures monospécifiques, elle vaut encore plus pour les cultures mixtes. On ignore beaucoup de choses sur l'interaction entre les micro-organismes et en quoi, par exemple, la physiologie des organismes fixés diffère des organismes planctoniques. La biotechnologie traditionnelle repose essentiellement sur des techniques de séparation, de culture et d'analyse qui s'appliquent à une culture monospécifique.

L'usage compétitif sur le plan commercial des grandes quantités de déchets de cellulose, de lignine et de chitosane engendrés par les industries agro-alimentaires et papetières se heurte à des difficultés parce que ces déchets sont plus difficiles à dégrader que des sous-produits tels que le petit lait et la mélasse. Afin d'exploiter la cellulose, on a recherché des micro-organismes possédant des cellulases très actives, que l'on pourrait utiliser dans de nouvelles fermentations alcooliques, par exemple. La dégradation de l'hémicellulose et du chitosane par des micro-organismes a également fait l'objet de recherches, en vue de la production d'oligosaccharides utiles. Cette exploitation des résidus de cultures se trouve opportunément complétée par leur utilisation comme matières premières pour la production de substances chimiques à valeur ajoutée, telles que des acides organiques et le tétrahydrofurane.

On prête une grande souplesse de conception aux procédés et aux matériaux industriels classiques, qui ont été mis au point sur plusieurs décennies. Cela reflète en partie la formation et la démarche des ingénieurs chimistes et des exploitants d'installations industrielles, qui ont eu l'occasion, au fil des ans, de se familiariser progressivement avec ces procédés. Les plastiques biodégradables, par exemple, ne possèdent pas à l'heure actuelle toute la gamme des propriétés techniques des polymères issus des combustibles fossiles. Cependant, la biotechnologie permet désormais de synthétiser de nouveaux polymères dotés, entre autres, de propriétés régiosélectives et stéréosélectives particulières. Parmi les exemples récents, figurent les polysaccharides linéaires et les plastiques de type polyhydroxyalcanoate, les cyclodextrines, les polymères fluorescents et les peptides synthétiques contenant des acides aminés artificiels.

Ingénierie des procédés biologiques : un exemple

Au stade actuel de l'évolution de la biotechnologie, où l'innovation est dominée par la biologie moléculaire, la R-D dévolue aux procédés biologiques risque d'être négligée ou insuffisamment financée. Le succès de la commercialisation de la biotechnologie dépend essentiellement de l'ingénierie des traitements par voie biologique; le tableau 3.6 récapitule certaines des questions à aborder. Par exemple, le traitement en aval, c'est-à-dire la séparation et la purification des produits après le stade de la culture, est un paramètre de poids dans l'estimation des coûts relatifs des biocatalyseurs industriels et des catalyseurs chimiques. Tant les coûts monétaires directs que les impacts sur l'environnement doivent être pris en considération, en particulier les effets du rejet des déchets sur la qualité de l'eau. A titre d'exemple, la séparation du biopolymère et du biocatalyseur lors de la production de biopolymères par des micro-organismes requiert en général cinq fois plus d'eau qu'un procédé chimique classique, ce qui implique qu'il faut fournir davantage d'énergie et une capacité de traitement de l'eau nettement supérieure et que, par conséquent, l'impact sur l'environnement dépasse largement les simples considérations financières. On pourrait résoudre ce type de problème en effectuant la synthèse dans des systèmes biphasiques eau-solvant organique et en recyclant le composé organique.

Tableau 3.6. **Problèmes d'ingénierie posés par les procédés biologiques à grande échelle**

| |
|---|
| Faible rendement et coût élevé des procédés biologiques |
| Faible rendement en produits |
| Grande consommation d'eau |
| Instabilité des souches et variabilité métabolique |
| Mise au point de procédés à base de cultures mixtes |
| Risque de contamination associé aux transformations conduites à température ambiante |
| Traitement en aval : séparation, purification en vue d'un traitement biologique intégré Innovation en matière de bioréacteurs pour micro-organismes : surveillance/régulation |
| Matériel onéreux requis par la complexité des procédés |
| Le personnel d'exploitation doit posséder des compétences multiples |
| Absence de surveillance et de régulation en temps réel |
| Problèmes propres aux produits recombinés (authenticité de la modification post-traductionnelle des protéines par exemple) (voir étude de cas 3.1, page 90) |
| Technologie de la culture des cellules animales et végétales |

Le traitement biologique intégré représente une avancée opportune dans ce contexte. Il vise à intégrer une activité biocatalytique améliorée et des méthodes pour séparer les catalyseurs des réactifs (substrats, produits), et à apporter un certain degré de purification, autrement dit à simplifier l'ensemble du procédé en réduisant le nombre d'étapes distinctes. Moritz et Duff (1996) ont rapporté un exemple intéressant et récent de traitement biologique intégré : la saccharification et la fermentation extractive simultanées. Le produit de départ, la cellulose, est transformé par hydrolyse enzymatique en glucose, qui est alors éliminé par fermentation en éthanol à l'aide d'une levure, afin de prévenir la rétro-inhibition de l'hydrolyse de la cellulose. L'éthanol, qui inhibe le processus de fermentation, est extrait par un solvant biocompatible non miscible à l'eau, l'alcool oléylique. Toutes ces réactions ont lieu dans la même cuve d'un réacteur et ne composent donc pas un procédé à plusieurs étapes requérant chacune sa propre installation. L'application des bioréacteurs séparateurs à la synthèse et à la récupération de produits à haute valeur ajoutée, notamment des protéines, est particulièrement encourageante.

Il existe désormais plusieurs modèles nouveaux de bioréacteurs susceptibles de servir de siège aux réactions biocatalytiques innovantes. Toutefois, l'inévitable question de l'échelle subsiste. Les produits pharmaceutiques et de chimie fine issus de la biocatalyse sont souvent fabriqués à une échelle relativement petite. Certaines substances chimiques de base ainsi que des aliments se prêtent

néanmoins à une production biocatalytique à grande échelle. Il existe donc une vaste gamme de procédés biotechnologiques applicables à la production industrielle. Il est essentiel de monter des projets de démonstration afin d'établir que les activités menées en laboratoire et la R-D à petite échelle peuvent être transposées aux niveaux de production industrielle requis par des applications spécifiques.

PERSPECTIVES

Le fait que de nombreux produits et procédés actuels soient désormais considérés comme préjudiciables à l'environnement et que beaucoup d'entre eux constituent une source de pollution majeure offre des conditions propices au développement et à la mise en œuvre de biotechnologies propres ou plus propres. La biotechnologie est susceptible de livrer des procédés propres ou tout au moins plus propres que les pratiques existantes qui engendrent des problèmes d'environnement, comme d'autres parties du présent rapport l'illustrent clairement. Le défi que doit actuellement relever la biotechnologie consiste à améliorer les opérations et fabrications industrielles nuisibles à l'environnement (voir les exemples du tableau 3.7). Quels problèmes se prêtent à l'intervention de la biotechnologie, qu'il s'agisse de dépolluer ou de proposer des procédés de substitution propres et novateurs?

Tableau 3.7. **Produits et procédés ayant des incidences sur l'environnement**

| Procédé ou produit | Problème d'environnement |
|--|--|
| Synthèses chimiques organiques | Émissions d'acides de solvants; résidus |
| Amines aromatiques | Fer dans l'eau de procédé |
| Synthèse de l'acrylonitrile | Émission d'acide cyanhydrique |
| Synthèse du PETP | Accumulation d'esters de méthyle |
| Épuration des effluents pharmaceutiques gazeux à l'éther de glycol | Impossibilité de séparer les mélanges de solvants qui se forment |
| Produits agrochimiques | Dispersion; eutrophisation |
| Encres, vernis, adhésifs | Émission de solvants |
| Plastiques et détergents synthétiques | Persistance |

Source : Wiesner, 1995.

Il est important de se rappeler que : i) de nombreux procédés pétrochimiques sont catalytiques et fournissent des rendements élevés en produits désirés et que ii) qualifier un procédé d'intrinsèquement nuisible à l'environnement risque d'induire en erreur (l'acide cyanhydrique, sous-produit de la synthèse de l'acrylonitrile – voir tableau 3.7 – est utilisé, par exemple, pour fabriquer de l'acétonitrile ou du méthacrylate de méthyle). Aussi la définition des objectifs prioritaires de la biotechnologie ne peut-elle reposer sur des critères simplistes. Il est essentiel de mener une analyse globale des procédés.

Produits et procédés industriels écologiquement viables

De nombreux composés organiques synthétiques largement utilisés et revêtant une grande importance économique pour une série d'applications ont des répercussions néfastes sur l'environnement et la santé humaine. La mise au point de nouvelles substances réduisant au minimum les risques pour l'environnement et la santé s'avère donc urgente et retient toute l'attention des chercheurs. Les stratégies qui intègrent un « principe de conception écologique », s'appliquant à chaque étape de la production, de l'utilisation et de l'élimination finale d'un produit respectueux de l'environnement, seront déterminantes pour réduire les atteintes à l'environnement (voir aussi le quatrième chapitre). La conception écologique permet de réaliser cet objectif (encadré 3.2).

Encadré 3.1. Biohydrogène

L'hydrogène gazeux a souvent été cité comme le combustible propre par excellence : sa combustion génère de l'énergie et ne produit que de l'eau (elle ne dégage pas de dioxyde de carbone). On sait depuis longtemps que les micro-organismes sont d'excellents producteurs d'hydrogène gazeux, aussi s'est-on demandé s'il serait rentable d'essayer de produire de l'hydrogène gazeux comme combustible par voie biotechnologique.

Les bactéries anaérobies sont les principaux producteurs d'hydrogène dans la nature et deux systèmes enzymatiques différents ont été décrits pour la production de l'hydrogène gazeux : les hydrogénases et les nitrogénases. En anaérobiose, les bactéries se débarrassent souvent de leur excès d'électrons par une réduction des protons en hydrogène gazeux catalysée par l'hydrogénase. Toutefois, du point de vue énergétique, ce procédé est légèrement défavorable et, dans la nature, seule une quantité relativement faible d'hydrogène est généralement produite par ce mécanisme. En revanche, les nitrogénases libèrent beaucoup plus d'hydrogène, même si on pense que la fonction première de ces enzymes est la fixation de l'azote. Il apparaît qu'une molécule d'hydrogène est produite pour chaque molécule d'azote fixée.

Les biotechnologues s'intéressent particulièrement aux bactéries photosynthétiques fixatrices d'azote, qui sont capables de capter la lumière solaire pour produire de l'hydrogène. Une partie de ces organismes tirent les électrons dont ils ont besoin des déchets organiques, tandis que d'autres sont à même de scinder les molécules d'eau. Chaque système est à l'étude actuellement, en particulier dans des laboratoires européens et japonais qui tentent de combiner la biotechnologie et l'ingénierie en vue de produire de l'hydrogène suffisamment pur à faible coût. Chaque procédé devra relever de nombreux défis avant d'être en mesure de concurrencer les sources physiques et chimiques d'hydrogène.

Encadré 3.2. Conception écologique

La conception écologique vise à faire en sorte que toutes les considérations d'environnement pertinentes et vérifiables soient prises en compte dans la conception du produit ou du procédé. On cherche à obtenir des produits et procédés qui soient à la fois respectueux de l'environnement, compétitifs par leur prix et performants. La conception écologique peut être mise en œuvre dans une application industrielle entièrement nouvelle et, ce qui est tout aussi important, dans des opérations existantes, afin de réduire le choc culturel et les dépenses en capital élevées que risque d'entraîner le remplacement d'une technologie intrinsèquement polluante par une nouvelle technologie « propre ». Dans ce contexte, la conception écologique se voit imposer une discipline qui la rend applicable aux opérations commerciales. La conception écologique insiste sur la nécessité d'aborder la protection de l'environnement de façon globale dans une économie à haute technologie : elle recouvre des notions telles que la réduction de l'utilisation des matières toxiques, la minimisation des déchets, la conception en vue du recyclage et bien d'autres, dans une analyse pluridimensionnelle complexe. L'analyse du cycle de vie (ACV) (voir le quatrième chapitre) complète la conception écologique en livrant des informations relatives à l'impact sur l'environnement; l'ACV ne fournit pas, quant à elle, de mécanisme permettant d'intégrer des considérations d'environnement déterminées dans la conception de produits et procédés écologiques. La conception écologique peut aider les fabricants à générer moins de déchets tout en abaissant les coûts de production. A mesure qu'augmentent le coût de l'élimination des déchets et les amendes pour infraction à la réglementation d'environnement, les caractéristiques écologiques des produits revêtiront forcément une importance croissante pour les consommateurs et les investisseurs. Toutes ces tendances laissent supposer que l'incorporation d'un volet environnemental dans la stratégie d'une entreprise constituera un facteur de compétitivité de plus en plus essentiel.

Source : Allenby, 1994.

Ce principe de conception peut être illustré par le «verdissage» d'un procédé existant, par exemple la mise au point d'un nouveau floculant. L'étude de cas 3.2 (page 91) décrit l'intégration d'une étape biotechnologique dans des installations de fabrication existantes qui utilisent des produits chimiques pour conférer une résistance à l'état humide à des matériaux d'emballage en papier et cellulosiques et qui, de ce fait, engendrent des sous-produits organochlorés indésirables.

Les floculants composés de hauts polymères, les dérivés du polyacrylamide en particulier, sont souvent utilisés dans une large gamme d'applications, y compris le traitement des eaux usées. De nombreux produits de consommation destinés à absorber de l'eau sont aussi fabriqués à partir de hauts polymères tels que le polyacrylate et des dérivés de la polyacrylamide. Ces polymères synthétiques sont à la fois efficaces par rapport à leur coût et performants. A ce propos, il est intéressant de noter que l'on dispose d'un procédé biotechnologique et respectueux de l'environnement pour fabriquer de l'acrylamide à partir de l'acrylonitrile avec des bactéries immobilisées, la production annuelle se chiffrant actuellement à plus de 10^4 tonnes. Malheureusement, des problèmes d'environnement sont associés aux polymères (biodégradabilité faible, donc persistance) et au monomère, l'acrylamide (toxicité).

Kurane *et al.* (1994) ont exploré les possibilités de produire de nouveaux biofloculants et ont découvert une protéine capable de floculer efficacement des particules organiques et inorganiques, allant de la boue activée aux cendres volantes rejetées par les centrales électriques, en passant par les pigments solubles dans l'eau nocifs pour l'environnement. Des études de faisabilité conduites sur ce floculant ont démontré son efficacité dans le traitement des flux de déchets provenant de l'élevage, de la mise en pâte et des industries pharmaceutiques et alimentaires.

Biotechnologie pour l'industrie chimique

L'énorme production annuelle de substances chimiques à travers le monde montre à quel point la société en est tributaire. Ce volume n'englobe pas uniquement des produits de consommation, mais aussi des intermédiaires et matériaux chimiques essentiels à d'autres industries aussi diverses que l'alimentation, la pharmacie, l'énergie, les télécommunications et les loisirs. Le choix de prendre l'industrie chimique comme exemple est donc logique et pertinent, mais des considérations analogues s'appliquent à tous les secteurs industriels.

Les procédés chimiques se déroulent souvent à température et pression élevées, si bien qu'ils sont non seulement énergivores, mais génèrent aussi des résidus et des sous-produits qui doivent être séparés du produit désiré. Il existe plusieurs moyens de réduire au minimum ou prévenir la formation de sous-produits, tels que la conception de nouvelles voies de synthèse, la mise au point de catalyseurs perfectionnés, l'amélioration de la sélectivité des catalyseurs et la modification du milieu réactionnel. Toutes ces options sont accessibles à la biotechnologie. L'étude de cas 3.3 (page 92), par exemple, démontre la supériorité d'un nouveau procédé de production de l'acide 7-aminocéphalosporanique (7-ACS, le point de départ de la fabrication des antibiotiques semi-synthétiques du groupe des céphalosporines) par voie enzymatique, qui réduit les résidus et l'utilisation d'adjuvants nuisibles à l'environnement.

Biocatalyseurs améliorés ou nouveaux

La mise au point de nouveaux catalyseurs s'effectue selon trois axes : i) la recherche dans des habitats naturels, tels que les sites géothermiques, de biocatalyseurs capables d'agir à haute température et dans des milieux artificiels; ii) la modification de biocatalyseurs existants par des méthodes génétiques ou physico-chimiques; et iii) la conception de catalyseurs à partir de molécules organiques ou inorganiques (voir l'annexe 1.2). Les biocatalyseurs naturels se composent d'enzymes opérant à l'extérieur de la cellule ou contenues dans des micro-organismes viables ou non viables ou dans d'autres cellules.

Sachant que moins de 1 pour cent des micro-organismes présents dans la nature ont été mis en culture, les chercheurs se tournent vers la biodiversité encore inexplorée des micro-organismes, dont on peut penser qu'elle offre de vastes possibilités inexploitées de biocatalyse. Une bonne partie de ce potentiel naturel peut être révélé par la bioprospection et mis à profit dans des applications industrielles.

Plusieurs avancées récentes de la biologie moléculaire facilitent cette exploration de l'univers des micro-organismes et l'exploitation de son potentiel génétique. Des sondes géniques sont utilisées pour identifier les micro-organismes dans des échantillons naturels d'après leurs caractéristiques taxonomiques ou fonctionnelles. Cette méthode permet de détecter des micro-organismes dotés de propriétés biocatalytiques particulières même s'ils ne sont pas encore cultivables. Une fois que ces organismes sont identifiés, on est en mesure de s'atteler à leur culture et à leur exploitation industrielle.

Des études du génome révèlent également les séquences et les fonctions des gènes. Cette information peut servir à concevoir de nouvelles sondes géniques capables de détecter des organismes possédant une activité enzymatique nouvelle mais connexe. Ainsi, on peut désormais concevoir selon un schéma rationnel des programmes de prospection destinés à déceler des biocatalyseurs, qui pourront ensuite être sélectionnés s'ils exercent une activité compatible avec des procédés industriels propres.

Les biocatalyseurs effectuent une grande variété de réactions chimiques avec un degré élevé de spécificité, mais les taux de catalyse sont sensibles à toute une série de conditions et d'agents dénaturants (métaux, solvants, chaleur), et les demi-vies opérationnelles sont souvent plutôt courtes. Cependant, au cours des dernières décennies, des progrès considérables ont été accomplis dans l'amélioration de la stabilité catalytique des enzymes et des cellules. Plus récemment, les efforts de recherche se sont concentrés sur des améliorations ayant trait à la modification de la spécificité vis-à-vis du substrat, à l'activité en milieu non aqueux et au rendement de la production d'enzymes. La glucose-6-phosphate déshydrogénase (G6PDH) représente un cas bien étudié de surproduction enzymatique qui démontre aussi les capacités de la technologie de l'ADN recombiné à l'égard de la réduction de la pollution. Au départ, l'enzyme était produite avec un faible rendement par la bactérie *Leuconostoc*. Le clonage du gène de la G6PDH dans *Escherichia coli* a permis d'obtenir finalement un rendement mille fois supérieur pour un volume de fermentation comparable. L'utilisation d'une *E. coli* recombinée s'est traduite par une économie considérable de matières premières et d'énergie et une forte réduction de la charge polluante. Le tableau 3.8 illustre l'incidence spectaculaire de l'amélioration de la productivité enzymatique sur la prévention de la pollution.

Ces dernières années, les événements les plus marquants en biocatalyse ont été la mise au point de molécules catalytiques destinées à effectuer des réactions non naturelles et la recherche constante d'enzymes nouvelles dans la nature. Ainsi que Zhang *et al.* (1997) l'ont affirmé, « Des protéines et des

Tableau 3.8. Réduction de la pollution par utilisation d'une bactérie recombinée pour produire un biocatalyseur

| Composante du procédé | <i>Leuconostoc</i> | <i>E. coli</i> recombinée |
|--|--------------------|---------------------------|
| Volume de fermentation (m ³) | 600 | 1 |
| Composants du milieu de croissance (kg) | 64 000 | 160 |
| Masse bactérienne (kg) | 22 000 | 200 |
| Eau de procédé (m ³) | 10 260 | 71 |
| Eau de refroidissement (m ³) | 15 000 | 30 |
| Air (m ³) | 114 000 | 570 |
| Électricité (kWh) | 20 000 | 370 |
| Vapeur (t) | 180 | 10 |
| Sulfate d'ammonium (kg) | 13 000 | 200 |
| Eaux usées (m ³) | 1 200 | 0,2 |
| Charge polluante (équivalent-habitant) | 300 000 | 300 |

L'unité de charge polluante (éq.hab.) équivaut à une personne sur 24 heures.

Source : Wiesner, 1995.

enzymes dotées de propriétés et fonctions nouvelles peuvent être obtenues soit en explorant la biodiversité naturelle qui recèle encore de nombreuses espèces inconnues, soit en améliorant des protéines ou des enzymes naturelles déjà connues. Cette dernière démarche se prête peut-être même mieux à la mise au point de propriétés ayant peu de chances d'avoir été sélectionnées au cours de l'évolution naturelle.» L'élan vers la recherche d'extrémophiles (micro-organismes présentant une croissance optimale dans des conditions extrêmes de température, d'acidité, d'alcalinité, de pression, de salinité, d'aridité, d'irradiation, etc.) repose sur en grande partie sur l'hypothèse que leurs enzymes posséderont des capacités catalytiques optimales dans des conditions propices aux transformations industrielles ou ménagères. Plusieurs enzymes appartenant à cette catégorie, à savoir les extrémozymes, ont été commercialisées (voir le deuxième chapitre). La prospection d'extrémophiles et d'autres domaines inexplorés de la diversité des micro-organismes est devenue une activité sophistiquée s'appuyant sur l'écologie des micro-organismes et l'analyse par sonde oligonucléotidique d'échantillons prélevés dans l'environnement. La détection de nouvelles extrémozymes peut s'effectuer de façon comparable en clonant des fragments aléatoires d'ADN provenant d'échantillons prélevés dans la nature et en sélectionnant parmi les clones obtenus ceux qui manifestent une activité intéressante.

Au cours de la dernière décennie, la gamme des biocatalyseurs s'est étendue à des molécules d'ARN catalytiques (ribozymes) et à des anticorps catalytiques (abzymes); en outre, des analogues artificiels de certaines de ces molécules ont également été créés. En général, les ribozymes ne présentent pas la même efficacité catalytique que les protéines, mais elles sont capables d'effectuer des transformations complexes et la mise au point de nouvelles ribozymes artificielles élargit considérablement leur répertoire catalytique. L'une des dernières percées dans ce domaine a été la construction d'un mécanisme régulateur à l'intérieur des ribozymes, qui imite l'action régulatrice exercée sur de nombreuses enzymes protéiques. Le greffage d'un site de liaison avec l'ATP sur une ribozyme a créé la première ribozyme allostérique : dans la régulation allostérique, un site de liaison est capable de reconnaître spécifiquement certaines petites molécules et d'altérer la vitesse de catalyse en modifiant la conformation de la protéine et, maintenant, de l'ARN. Dans ce cas, la présence d'ATP active la ribozyme. Il serait possible de coupler une fonction catalytique à un commutateur moléculaire, ce qui ouvrirait la voie à la création de systèmes fondés sur des réseaux d'ARN, analogues à l'intelligence artificielle.

Les anticorps catalytiques (abzymes) ont été signalés pour la première fois il y a à peine plus d'une décennie. L'attrait que suscitent inévitablement les anticorps découle de leur spécificité extraordinairement élevée, ce qui signifie qu'un anticorps spécifique peut être dirigé, au moins potentiellement, contre n'importe quelle substance. En d'autres termes, le système immunitaire se prête à la création de catalyseurs sur mesure. La technologie de la production des abzymes sort du cadre du présent rapport, mais on dispose déjà de types capables de catalyser un large éventail de réactions chimiques. Il existe une grande variété d'applications potentielles pour les abzymes, qui vont de la désintoxication dans le cas de certaines toxicomanies difficiles à traiter telles que la cocaïne à la catalyse de réactions chimiquement défavorables.

Bien que des recherches très actives soient menées au sujet des paramètres fondamentaux qui gouvernent la structure tridimensionnelle et la fonction des protéines, d'énormes lacunes subsistent encore à propos de deux phénomènes essentiels : la relation entre la séquence et la structure et la relation entre la structure et la fonction. Si bien que la conception rationnelle de nouvelles protéines selon la tendance réductionniste classique a donné des résultats frustrants (Arnold, 1996). Une stratégie récente qui consiste à modifier les propriétés des enzymes ou protéines naturelles en vue de créer des propriétés définies s'est propagée sous le nom d'« évolution dirigée » (encadré 3.3). Il faut pour ce faire provoquer plusieurs cycles de mutagenèse en vue de mettre sur pied une bibliothèque de mutants dont on peut tester les propriétés; les mutants sélectionnés au cours de chaque cycle deviennent les parents de la série suivante. Les mutants peuvent être générés suivant divers modes opératoires, destinés à induire des changements aléatoires ou dirigés sur certains sites sur l'ADN, et la fréquence de mutation peut être adaptée aux contraintes du programme de sélection. Il existe une technique complémentaire, le « bataille de l'ADN », qui consiste à prendre un ensemble de séquences d'ADN

Encadré 3.3. Évolution dirigée des enzymes

Les ingénieurs chimistes qui tentent de concevoir des procédés industriels utilisant des biocatalyseurs se heurtent constamment au simple fait que les systèmes biologiques ont évolué sur des milliards d'années avant d'arriver à accomplir des réactions très spécifiques dans des milieux déterminés. Certaines caractéristiques requises pour agir dans un système chimique complexe deviennent indésirables dès lors que le catalyseur est retiré de son environnement naturel. Inversement, de nombreuses propriétés qu'on souhaiterait voir possédées par les enzymes sont incompatibles avec celles exigées par les procédés industriels. L'évolution dirigée est apparue récemment comme un substitut très prometteur à l'ingénierie rationnelle des protéines en vue du développement d'enzymes inédites.

L'évolution dirigée représente une démarche très pragmatique pour construire des enzymes adaptées à toute une gamme d'applications. En dotant les enzymes de nouvelles caractéristiques et fonctions, on peut les « régler » pour qu'elles exercent une activité optimale dans des conditions déterminées. L'imitation des processus fondamentaux de l'évolution darwinienne dans un tube à essais permet d'explorer les fonctions des enzymes sans subir les contraintes du fonctionnement dans un système vivant. De surcroît, l'évolution dirigée peut s'appliquer même lorsque la structure ou le mécanisme catalytique de l'enzyme sont très mal connus. Comme les caractéristiques de la grande majorité des protéines sont largement ignorées, c'est là un énorme avantage de cette méthode. Permettant de rechercher des solutions inédites aux problèmes associés à la conception des protéines, cette méthode promet aussi de révéler beaucoup d'informations au sujet de la structure et de la fonction des protéines. Elle a été mise à profit pour améliorer la stabilité des enzymes (température de fusion, demi-vie catalytique, stabilité en milieu organique), la spécificité de substrat et la stéréosélectivité (sélection de molécules chirales).

Une enzyme de type protéase, la subtilisine, utilisée comme adjuvant dans le nettoyage des vêtements, est stabilisée par le calcium. Malheureusement, l'exploitation industrielle de cette enzyme est fréquemment menée en présence de chélateurs, qui séquestrent le calcium et déstabilisent l'enzyme. La séquence d'acides aminés de l'enzyme qui se lie au calcium peut être supprimée, et il est possible de recourir à la mutagenèse dirigée et à la sélection pour conférer à la subtilisine une stabilité indépendante du calcium. On a produit par ce biais une enzyme qui a conservé l'activité catalytique de l'enzyme originelle, mais dont la stabilité a été accrue d'un facteur 1000 en présence de chélateurs puissants.

Une estérase bactérienne a subi une évolution dirigée en vue de remplacer un procédé comportant un solvant au zinc, utilisé dans la production d'antibiotiques semi-synthétiques de la classe des céphalosporines. La mutagenèse séquentielle et la recombinaison aléatoire des gènes de variants positifs ont engendré une nouvelle enzyme possédant une activité 50 à 60 fois supérieure à celle de l'enzyme originelle. Cela démontre la possibilité de mettre au point un procédé plus respectueux de l'environnement qui supprime l'emploi du solvant et la formation de déchets renfermant du zinc.

Les recherches sur l'évolution dirigée s'orienteront à l'avenir vers la mise au point de méthodes de prospection à grande échelle, permettant de parcourir efficacement de vastes bibliothèques de mutants. La mise sur pied de bibliothèques de mutants optimisés rendra aussi la prospection moins nécessaire. Outre qu'elles rationaliseront les efforts visant à « régler » les enzymes sur telle ou telle fonction, ces améliorations autoriseront des progrès plus marqués, tels que la création de nouvelles activités catalytiques. L'optimisation des stratégies de recherche donnera lieu à des améliorations sensibles en termes de facilité et de champ d'application de l'évolution dirigée. Les nombreuses ressemblances avec les problèmes d'optimisation rencontrés dans d'autres domaines créent des conditions propices à une collaboration entre théoriciens et praticiens œuvrant dans une large gamme de disciplines de l'ingénierie.

Le battage de l'ADN a été mis au point récemment en vue d'induire par évolution dirigée une activité de fucosidase à partir d'une galactosidase bactérienne. Après plusieurs cycles de battage de l'ADN et de sélection, on a obtenu une enzyme dont la spécificité de la fonction fucosidase était accrue d'un facteur 1000 par rapport à l'enzyme originelle. Le battage de l'ADN peut également être mis à profit afin de combiner deux ou plusieurs propriétés ayant évolué séparément. L'évolution dirigée de la subtilisine, par exemple, a donné lieu à des variants dotés soit d'une plus grande stabilité au peroxyde d'hydrogène, soit d'une activité catalytique améliorée; les variants présentent rarement une amélioration des deux propriétés. Cependant, les deux populations de variants peuvent être recombinées pour créer des enzymes plus stables et dotées d'un pouvoir catalytique supérieur.

Source : Stransberg *et al.*, 1995; Moore et Arnold, 1996; Arnold, 1996; Zhang *et al.*, 1997; Kuchner et Arnold, 1997.

étroitement apparentées, à les fragmenter au hasard et à réassembler les fragments en gènes. Ce procédé débouche rapidement sur une combinaison de mutations favorables (désirées), étant donné que le produit d'un cycle sert à alimenter le cycle suivant et que le battage réitéré de l'ADN fait avancer efficacement l'évolution dirigée. Ces procédures possèdent un grand avantage, celui d'entraîner l'évolution rapide de n'importe quelle protéine, même si sa structure est inconnue.

Milieu réactionnel de la biocatalyse

L'utilisation de solvants organiques en vue de favoriser la biotransformation de composés peu solubles dans l'eau est désormais bien au point au stade de la R-D. On découvre également des micro-organismes qui se développent dans des concentrations remarquablement élevées de solvants (par exemple, 50 pour cent en volume de toluène), ou chez lesquels il est possible d'induire ces capacités par évolution dirigée (voir encadré 3.4). La recherche s'est tournée plus récemment vers l'utilisation de fluides supercritiques comme milieu réactionnel de la biocatalyse (Kamat *et al.*, 1995). Les fluides supercritiques sont des substances non aqueuses maintenues au-dessus de leur température critique afin d'empêcher leur liquéfaction; ils présentent des propriétés intermédiaires entre celles des liquides et des gaz. Les fluides supercritiques offrent plusieurs avantages substantiels pour les transformations biologiques, notamment la solubilisation des réactifs hydrophobes, une faible toxicité, l'augmentation des vitesses de réaction enzymatique, la facilitation des opérations en aval, la

Encadré 3.4. Biocatalyse en milieu non aqueux

Une découverte relativement récente et intéressante pour les procédés industriels non polluants montre que les enzymes sont capables de conserver leur activité catalytique en l'absence d'eau. Les biocatalyseurs véhiculés en milieu non aqueux peuvent être utilisés dans divers procédés industriels incompatibles avec l'eau. Le phénomène de la catalyse enzymatique dans des solvants organiques semble dû à la rigidité structurelle des protéines dans des solvants organiques qui empêche leur déploiement. Les applications des transformations biologiques conduites en milieu non aqueux devraient déboucher sur des avancées appréciables dans les domaines des combustibles fossiles, des produits de départ renouvelables, de la synthèse organique et des technologies de maîtrise de l'environnement.

Les enzymes solides exposées à des solvants non aqueux manifestent des propriétés nouvelles remarquables, par exemple une stabilité thermique nettement accrue et des modifications radicales de la spécificité de substrat. Plusieurs conversions enzymatiques intéressantes et utiles sont donc réalisables dans des solvants organiques. Afin de tirer parti des nouvelles possibilités offertes par la biocatalyse non aqueuse, il est impératif de comprendre les caractéristiques fondamentales de l'influence du solvant sur l'enzyme et ses propriétés catalytiques. Comprendre en détail les relations milieu-structure-fonction des enzymes suspendues dans un milieu organique permettrait sans doute de prévoir comment réguler les fonctions enzymatiques en agissant simplement sur le solvant.

Les fluides supercritiques forment une catégorie particulière de milieux non aqueux pour la biocatalyse. La faible viscosité comparable à celle d'un gaz et la diffusivité élevée des fluides supercritiques augmentent la vitesse du transfert de masse des substrats vers l'enzyme. En revanche, leur densité proche de celle d'un liquide leur confère un pouvoir dissolvant plus élevé. Les propriétés physiques d'un fluide supercritique peuvent subir une gamme étendue de variations, moyennant une modification de pression ou de température relativement faible. Voici les avantages de l'utilisation des enzymes dans les fluides supercritiques : les réactions de synthèse dans lesquelles l'eau est un produit peuvent être effectuées de façon complète, la solubilité des substances hydrophobes est accrue par rapport à celle observée dans l'eau, la thermostabilité des molécules biologiques est plus grande dans les fluides supercritiques que dans l'eau, il est facile de recycler le solvant, les réactions et les séparations biochimiques peuvent être intégrées en une seule étape.

Source : Zaks et Klibanov, 1988; Kamat *et al.*, 1995.

protection contre des contaminations microbiennes et des possibilités de recyclage. On dispose de plus en plus de données tendant à prouver que l'activité enzymatique, la spécificité de substrat et la stéréosélectivité (sélection de molécules chirales) peuvent toutes être modulées par la modification de la pression réactionnelle. Par exemple, la lipase de la levure *Candida* catalyse une réaction entre le méthacrylate de méthyle et l'éthylhexanol qui produit des polymères chiraux; la vitesse de réaction est sensiblement accrue lorsque la réaction se déroule dans un fluide supercritique tel que l'hexafluorure de soufre. La lipase a aussi été employée pour catalyser la synthèse du polyester et, lorsque la réaction est conduite dans un fluide supercritique tel que le fluoroforme, le poids moléculaire du polymère peut être régulé par la pression réactionnelle.

TECHNOLOGIES NAISSANTES

La biocatalyse évoquée plus haut concerne des réactions relativement simples, en une étape. Les procédés de fermentation traditionnels fondés sur des cultures monospécifiques définies ont ouvert la voie à l'élaboration de synthèses et de transformations chimiques complexes et conduites en plusieurs étapes. Des moyens complémentaires offerts par la génétique sont aussi mis à profit pour augmenter la polyvalence des transformations et créer des voies métaboliques qui ne sont pas apparues au cours de l'évolution chez les organismes naturels. Ces démarches sont exploitées dans des cultures mixtes de micro-organismes, dans le génie génétique s'appliquant à la création d'organismes recombinés et dans l'ingénierie des voies métaboliques.

Cultures mixtes

La découverte empirique et l'exploitation des cultures mixtes a des précédents anciens, mais l'effort d'identification des agents responsables des maladies humaines et animales entrepris au XIX^e siècle a conduit inévitablement à une longue période de microbiologie dite en culture pure. A part quelques exceptions notables, telles que le procédé de traitement des eaux usées par boues activées, introduit en 1914, la tradition de la culture monospécifique remontant à Koch a dominé la microbiologie du XX^e siècle et par conséquent la biotechnologie. Toutefois, un bioflocculant de type polysaccharide produit depuis peu par une culture mixte de micro-organismes constitue une exception remarquable à cet égard (Kurane et Matsuyama, 1994). Les cultures mixtes connaissent cependant un regain d'intérêt depuis l'émergence d'une volonté généralisée de produire des protéines de micro-organismes à partir de ressources renouvelables. En dépit des recherches excellentes qui ont été conduites et des procédés mis au point, ces activités reposant sur des cultures mixtes n'ont pas rencontré de succès commercial, en grande partie parce qu'elles ne sont pas compétitives avec les protéines de soja. Depuis le premier rapport faisant le point sur la microbiologie et la biotechnologie des cultures mixtes (Bull et Slater, 1982), la recherche sur les cultures mixtes s'est poursuivie sur un rythme plutôt intermittent dans des domaines tels que le traitement des déchets toxiques, l'accumulation des métaux, les transformations des stéroïdes et, ironiquement, l'action pathogène. Les cultures mixtes retiennent également l'attention de ceux qui mettent au point des traitements biologiques intégrés (voir plus haut la section «Goulets d'étranglement et besoins du marché non satisfaits»).

Les avantages du recours à des cultures mixtes dans l'industrie sont reconnus. Ils comprennent l'augmentation du rendement des produits, la diminution du risque de contamination (voir l'étude de cas 3.3 pour des exemples), une résistance accrue aux perturbations du procédé et, dans certains cas, une réduction de la charge des effluents. Les cultures mixtes se rattachent à deux types : des populations mixtes de micro-organismes naturels, dont la composition est souvent indéfinie, et des populations construites de micro-organismes déterminés. Lorsqu'on met au point des procédés biotechnologiques recourant à des cultures mixtes naturelles, il importe pour plusieurs raisons d'identifier la composition de ces populations mixtes. Le procédé devrait être mené avec des organismes « considérés généralement comme sans danger », et la présence de membres inconnus dans une culture mixte est susceptible de ne pas répondre à cette exigence. En outre, la régulation et la stabilité du procédé risquent d'être compromises si la culture mixte contient des organismes non identifiés dont la fonction au sein de celle-ci demeure inconnue. Il arrive que l'association de deux espèces soit si intime que

l'existence d'une population mixte passe inaperçue. En 1940, par exemple, une seule espèce, *Methanobacillus omelianskii*, a été identifiée dans une population productrice de méthane et ce n'est que 27 ans plus tard qu'on a découvert qu'il s'agissait en fait d'une association de deux espèces distinctes dont l'intégration métabolique était extrêmement étroite et essentielle à la production de méthane.

Des techniques récentes, indépendantes des modalités de la culture, telles que l'hybridation fluorescente *in situ* (*fluorescent in situ hybridization* : FISH) permettent d'élucider la structure et la dynamique des cultures mixtes, même les plus complexes. La signature des micro-organismes réside dans la séquence de nucléotides de leur ARN ribosomique. Or il est possible de concevoir des oligonucléotides complémentaires de ces signatures, de les attacher à des marqueurs fluorescents et de les utiliser pour détecter des organismes particuliers au sein d'une culture mixte. L'un des résultats les plus frappants de l'application de l'hybridation fluorescente *in situ* a été l'analyse des cultures mixtes des boues activées, supposées être bien connues. Sur la base des méthodes de culture traditionnelles, on avait cru que les bactéries dominantes dans les boues activées étaient des protéobactéries de la sous-classe gamma. L'hybridation fluorescente *in situ* a prouvé que cette hypothèse était fautive et que les bactéries de la sous-classe bêta étaient en fait plus abondantes *in situ*; autrement dit, elle a démontré l'absence de fiabilité des méthodes classiques d'étalement de cultures. Il est donc urgent, pour la recherche en biotechnologie, de mettre au point de nouveaux procédés permettant de cultiver les organismes qui sont dominants dans les écosystèmes et peuvent être détectés, mais que l'on n'a pas encore réussi à cultiver en laboratoire. La combinaison de l'hybridation fluorescente *in situ* avec des micro-détecteurs en vue d'analyser la structure et la fonction de la communauté, à l'échelon des micro-organismes individuels, devrait faire progresser sensiblement notre compréhension du comportement des cultures mixtes.

Les bactéries ont développé toute une série de mécanismes biochimiques de transduction pour reconnaître des signaux dans leur environnement et réguler ainsi l'expression de leurs gènes. Si la détection des informations provenant de leur milieu physico-chimique, d'animaux et de plantes a fait l'objet de nombreux travaux, la portée de la transmission de signaux entre les bactéries n'a été découverte que récemment. Les mécanismes de communication que les bactéries ont acquis en vue de détecter leur propre densité de population et de moduler l'expression de leurs gènes en conséquence sont particulièrement intéressants. Selon Gray (1997), « Avant qu'un groupe de bactéries n'émette une réponse quelconque, il doit évaluer sa densité de population : combien de cellules sont-elles disponibles pour diviser le travail nécessaire ou pour former un groupe unifié ? ». La détection par quorum (encadré 3.5) est l'un des mécanismes les plus répandus parmi les bactéries pour communiquer et déclencher un comportement coopératif.

Les signaux moléculaires émis par les bactéries qui ne prennent pas le Gram sont des lactones (que l'on appelle des auto-inducteurs), tandis que beaucoup de bactéries qui prennent le Gram produisent des signaux peptidiques (que l'on appelle des phéromones) qui exercent une fonction dans la détection par quorum. Il est tout à fait possible qu'il existe une communication interspécifique au sein de ces grands groupes de bactéries et qu'une espèce modifie son comportement en réaction à la présence d'autres. La connaissance de ces interactions pourrait être déterminante pour comprendre le comportement général des cultures mixtes et apprendre à les manipuler à des fins biotechnologiques. La concentration des éliciteurs moléculaires augmentera parallèlement à l'accroissement des populations et dans les circonstances qui empêchent une diffusion vers l'extérieur, comme ce peut être le cas dans les biofilms et d'autres agrégations de micro-organismes. C'est pourquoi le phénomène de la détection par quorum devrait maintenant être pris en considération lors de la conception et de l'analyse de systèmes de bioréacteurs utilisant des cellules immobilisées.

Un autre aspect de la détection par quorum offre des possibilités biotechnologiques, il s'agit de la communication entre différentes espèces de bactéries. On sait qu'un grand nombre d'espèces produisent des auto-inducteurs, ou phéromones, et que la capacité des espèces de faire la distinction entre différents produits chimiques éliciteurs n'est pas absolue. De surcroît, il est désormais relativement simple de dépister la production de signaux, et des bibliothèques de ces produits chimiques pourraient être constituées dans un avenir proche. Il est donc envisageable d'utiliser les auto-inducteurs et les phéromones en vue d'éliciter des activités métaboliques et la production de composés (par

Encadré 3.5. Détection par quorum

A l'instar des fourmis, les bactéries manifestent un comportement social. Jusqu'à il y a quelques années, on pensait que le phénomène de la transmission de signaux n'avait connu qu'un développement très limité au cours de l'évolution. Il a été mis en évidence chez les myxomycètes, les mycobactéries et l'actinomycète *Streptomyces*, mais pratiquement pas chez d'autres organismes. Ces cas isolés sont désormais considérés comme le sommet de l'iceberg de l'éthologie des micro-organismes.

La bioluminescence chez la bactérie marine *Photobacterium fischeri* constitue le point de repère des études modernes sur la transmission de signaux chez les micro-organismes et la réaction de leurs populations. Pour simplifier, un gène, *luxI*, code pour la synthèse d'un membre d'une classe de composés intervenant dans la détection par quorum, les N-acyl 2-aminobutyrolactones (AABL). Un deuxième gène, *luxR*, code pour une protéine qui active *luxI* en réaction à la présence d'une AABL. Aussi, l'effet global se traduit-il, lorsque l'AABL atteint une concentration de seuil, par une amplification rapide du signal inducteur. Chez *P. fischeri* et chez d'autres bactéries qui ne prennent pas le Gram, les éliciteurs de type 2-aminobutyrolactones doivent se trouver à l'intérieur de la bactérie pour produire leurs effets.

L'émission de signaux véhiculés par des 2-aminobutyrolactones n'a pas été rapportée chez les bactéries qui prennent le Gram; les signaux moléculaires de celles-ci sont généralement composés de phéromones peptidiques (PP). Les PP sont reconnues par la composante sensible d'un système régulateur à deux composantes; à nouveau, la synthèse de PP est un processus autorégulateur qui déclenche la synthèse de PP et un comportement dépendant de la densité de population. Contrairement aux signaux véhiculés par des 2-aminobutyrolactones chez les bactéries qui ne prennent pas le Gram, les PP interagissent avec des détecteurs protéiques situés à la surface de la membrane cellulaire et n'ont pas besoin de pénétrer à l'intérieur de la cellule.

L'éventail des comportements qui dépendent de la densité de population englobe la luminescence, la motilité par grouillement, la division cellulaire, et la synthèse de facteurs de virulence, de métabolites secondaires (antibiotiques, pigments), de polysaccharides et d'enzymes chez les bactéries qui ne prennent pas le Gram, ainsi que les capacités génétiques et la synthèse de facteurs de virulence et d'antibiotiques chez les bactéries qui prennent le Gram. Ce domaine de recherche comporte un aspect fascinant, à savoir la possibilité d'arrêter la progression d'une maladie en démantelant le dispositif de détection par quorum chez les bactéries pathogènes. Aussi la mise au point d'antagonistes des AABL ouvre-t-elle la voie à de nouveaux composés thérapeutiques anti-infectieux. Du point de vue de la biotechnologie, les AABL et leurs analogues présentent une propriété particulièrement intéressante qui est leur pouvoir d'alloinduction et/ou d'alloinhibition. L'alloinduction se réfère à l'activation d'un gène d'une espèce par une autre espèce, tandis que l'alloinhibition recouvre l'inhibition d'une espèce provoquée par un signal émis par un autre organisme. L'alloinduction peut être mise à profit pour prospecter des produits naturels en exposant des micro-organismes à des AABL et en sélectionnant les produits de gènes silencieux. La production des antibiotiques de la classe des carbapénèmes par la bactérie *Erwinia caratovora*, pathogène pour les végétaux, en réaction à la N-(3-oxohexanoyl)-L-2-aminobutyrolactone fournit un exemple de ce type de découverte.

Source : Fuqua et al., 1996; Gray, 1997; Robson et al., 1997; Kleerebezem et al., 1997.

exemple des agents antimicrobiens, des antagonistes de récepteurs et des enzymes), de les soumettre à des procédures de tri à grand débit, et d'étendre ainsi les options de la recherche biotechnologique et des programmes de découverte.

Technologie de l'ADN recombiné

La technologie de l'ADN recombiné offre de très nombreuses possibilités de combiner diverses capacités génétiques. Elle se prête à la modification génétique d'organismes exerçant des activités catalytiques spécifiques. Aussi les organismes peuvent-ils être modifiés par voie génétique en vue d'accomplir certaines fonctions catalytiques spécifiques et d'agir à haute température, dans des concentrations élevées de solvant, ou dans d'autres conditions caractéristiques des procédés

industriels. On recherche souvent les enzymes produites par des organismes qui vivent naturellement dans des milieux extrêmes, tels que les sources chaudes ou les sources hydrothermales sous-marines situées à grande profondeur. Ces enzymes peuvent alors être transférées dans des organismes plus faciles à manipuler tels qu'*E. coli* ou des levures, qui sont traditionnellement cultivés dans des réacteurs industriels. Inversement, les capacités catalytiques d'organismes moins tolérants peuvent être transférées vers ceux qui se développent mieux dans des conditions plus rudes.

Les organismes recombinés peuvent être exploités en vue de produire des enzymes qui sont des biocatalyseurs utiles (voir le tableau 3.9). Comme ces organismes recombinés se prêtent à la culture en enceinte fermée selon les bonnes pratiques de production industrielle à grande échelle, les considérations de sécurité qui se rapportent à la dissémination dans l'environnement sont respectées au maximum. L'utilisation des enzymes produites par recombinaison comporte des avantages, mais certains pays, tels que l'Allemagne, exigent encore l'emploi d'enzymes qui ne procèdent pas d'une recombinaison pour certaines applications, telles que les transformations alimentaires.

Tableau 3.9. Réduction de la consommation de ressources obtenue grâce au génie génétique

| | Matières premières (poids) | Eau (poids) | Vapeur (poids) | Électricité (kWh) |
|--|-------------------------------|----------------|-------------------|----------------------|
| Micro-organisme classique | | | | |
| Fermentation | 65 | 36 | 26 | 75 |
| Récupération | 35 | 64 | 74 | 25 |
| Total | 100 | 100 | 100 | 100 |
| Micro-organisme génétiquement modifié | | | | |
| Fermentation | 32 | 18 | 13 | 38 |
| Récupération | 27 | 35 | 39 | 13 |
| Total | 59 | 53 | 52 | 51 |
| Pourcentage économisé | 41 % | 47 % | 48 % | 49 % |

Source : Novo Nordisk, 1996.

La biotechnologie moderne est susceptible d'avoir un impact favorable sur l'environnement par rapport aux techniques traditionnelles (voir aussi le premier chapitre). A titre d'exemple, les enzymes issues d'organismes recombinés ont des rendements de fermentation plus élevés et permettent ainsi d'abaisser la consommation des ressources nécessaires à leur production. Le tableau 3.9 compare les ressources consommées lors de la fabrication d'une enzyme donnée à partir d'organismes classiques et à partir d'organismes génétiquement modifiés. Les chiffres fournissent un pourcentage d'économie de consommation par tonne d'enzyme produite par rapport à l'organisme producteur classique.

Le tableau 3.8 fournit un autre exemple qui montre comment le remplacement de procédés de fermentation traditionnels par une fermentation régie par la biotechnologie moderne peut donner lieu à une production enzymatique moins polluante.

De nombreuses applications biotechnologiques pour des produits et procédés industriels plus propres s'appuieront sur des micro-organismes recombinés. La plupart de ces procédés seront conduits en enceinte fermée et se conformeront donc aux lignes directrices existantes pour les applications industrielles de l'ADN recombiné. Les critères de l'OCDE concernant les considérations de sécurité relatives à l'utilisation d'organismes à ADN recombiné dans l'industrie prescrit de manipuler les organismes selon les bonnes pratiques de production industrielle à grande échelle (OCDE, 1986). Les bonnes pratiques de production industrielle à grande échelle exigent d'utiliser une enceinte de confinement adaptée au risque présenté par l'organisme recombiné. Le confinement peut être biologique, lorsqu'il repose sur les caractéristiques intrinsèques d'un organisme qui sont de nature à limiter sa survie dans l'environnement et sa capacité à transférer de l'ADN à d'autres organismes, ou physique,

s'il est réalisé à l'aide du matériel, des pratiques opératoires et d'une conception de l'installation qui réduit au minimum les possibilités de libération des organismes recombinés dans l'environnement. Le degré de confinement physique devrait être proportionnel au risque présenté par l'organisme. Cette stratégie de manipulation des organismes recombinés devrait pouvoir s'appliquer aux procédés industriels propres dans la plupart des cas et s'appuyer sur les pratiques de sécurité existantes utilisées pour manipuler d'autres organismes.

S'agissant des produits plus propres obtenus par voie biotechnologique, les scientifiques s'accordent à dire que le risque devrait être évalué en fonction des propriétés intrinsèques du produit plutôt que de son procédé de fabrication. Par conséquent, les mêmes considérations s'appliquent aux produits élaborés à l'aide d'organismes recombinés et à ceux fabriqués par d'autres moyens. Il convient toutefois de prendre en compte la contamination éventuelle du produit par l'ADN recombiné ou par d'autres substances utilisées au cours de sa fabrication. Il pourrait donc s'avérer pertinent, pour les produits obtenus à l'aide d'organismes recombinés, d'examiner si l'ADN recombiné introduit ou si tout autre substance intervenant dans leur fabrication exigent une vérification particulière en tant que source possible de contamination. Certains pays pratiquent une surveillance réglementaire supplémentaire pour tous les procédés qui font intervenir des organismes recombinés intergénériques à des fins commerciales, non seulement au niveau de la production proprement dite, mais aussi de la R-D. Généralement la restriction réglementaire est fortement réduite lorsque le procédé est correctement confiné et qu'il respecte les bonnes pratiques de production industrielle à grande échelle.

Ingénierie des voies métaboliques

L'établissement de cultures mixtes de micro-organismes constitue une manière de combiner différents métabolismes complémentaires en vue de mener à bien les transformations et les synthèses désirées. Une autre stratégie qui suscite actuellement un grand intérêt à cet égard est l'ingénierie des voies métaboliques, autrement dit, l'assemblage, grâce à la technologie de l'ADN recombiné, de séquences métaboliques au sein d'un même organisme. Cette méthode s'est appliquée au début à la conception de micro-organismes destinés à dégrader des substances chimiques toxiques pour l'environnement. Des composés tels que les biphényles polychlorés, les dioxines et les chlorodibenzofurannes sont très difficiles à traiter et on n'a pratiquement pas trouvé d'organismes capables à eux seuls de les dégrader ou de les détoxifier efficacement. La construction par modification génétique de bactéries capables de métaboliser ces types de substances chimiques a été réalisée par le regroupement d'enzymes de différents organismes exerçant des activités complémentaires. Récemment, le battage de l'ADN (voir encadré 3.3) a été appliqué avec succès pour la première fois à la conception d'une voie métabolique *in vitro*, à savoir un opéron de trois gènes codant pour la résistance à l'arsenic (Cramer *et al.*, 1997).

S'agissant des voies de biosynthèse, l'industrie des fermentations a une expérience considérable de la création de substances inédites par l'alimentation de cultures de micro-organismes à l'aide de produits chimiques précurseurs en vue de leur incorporation dans les produits visés, par exemple des antibiotiques. Cette stratégie s'illustre actuellement dans la production de nouveaux antibiotiques de la classe des érythromycines par un procédé biologique en deux étapes. Durant la première étape, la synthèse du précurseur normal de l'antibiotique est inhibée; elle cède la place à l'alimentation de la culture par des analogues artificiels. Les composés intermédiaires artificiels qui en résultent sont ensuite métabolisés au cours de la deuxième étape par une autre bactérie qui produit le nouvel antibiotique. Le prolongement logique de ces expériences consiste à utiliser la technologie de l'ADN recombiné pour assembler la nouvelle voie de synthèse métabolique *in vivo* dans un seul organisme.

Les meilleurs exemples de l'ingénierie des voies métaboliques se rapportent à la synthèse biologique des polykétides aromatiques, pour laquelle on a mélangé et associé les enzymes appropriées en vue de créer des voies de synthèse biologique hybrides. Les polykétides forment une grande famille de produits naturels présents dans les bactéries, les champignons, les algues microscopiques et les plantes; elles incluent des produits bactériens ayant une importance commerciale tels que des antibiotiques (érythromycine, tétracycline), des composés antiparasitaires (avermectine), anticancéreux

(doxorubicine) et immunosuppresseurs (rapamycine). La biochimie et la génétique de certaines synthèses de polykétides sont connues dans leurs moindres détails, notamment chez la bactérie *Streptomyces*, où l'ensemble des gènes qui gouvernent la synthèse des polykétides ont été caractérisés en profondeur. Ces gènes codent pour des assortiments modulaires d'enzymes de synthèse (les enzymes dénommées « polyketide synthases », PKS, sont responsables de la synthèse des polykétides), et les PKS de différentes bactéries peuvent être recombinaisonnées par voie génétique pour produire de nouveaux composés. Au départ, ces constructions ont été réalisées de façon empirique, mais lorsque les différentes enzymes ont été mieux comprises, des règles pour la conception rationnelle de nouvelles polykétides ont été arrêtées. Les PKS nécessaires à la synthèse d'un polykétide doivent exprimer au moins quatre activités enzymatiques; divers composants auxiliaires des PKS catalysent des modifications de la structure de base, susceptibles d'altérer la taille et la forme de la molécule et, par conséquent, son activité biologique. Aussi, comme l'affirment Hopwood et Khosla, les deux principaux défenseurs de cette stratégie, « les possibilités d'engendrer une diversité moléculaire au sein de cette classe de molécules sont énormes » (McDaniel *et al.*, 1995). La prochaine étape de cette recherche comportera presque à coup sûr une forme d'évolution dirigée des PKS destinée à créer des propriétés catalytiques qui n'existent pas chez les enzymes naturelles et à développer ainsi encore davantage les possibilités de concevoir de nouvelles polykétides.

La recherche progresse également vers la mise au point de réacteurs multienzymatiques dits « one-pot » (à cuve unique) destinés à réaliser des synthèses complexes. Ici, les mélanges d'enzymes sont utilisés dans des systèmes dépourvus de cellules; parmi les réussites enregistrées jusqu'à présent, signalons la synthèse *in vitro* d'un polykétide naturelle, la tétracénomycine, à partir d'un substrat composé simplement d'acides aminés. Les possibilités de produire de nouvelles polykétides *in vitro* s'étendront à mesure que s'élèvera le nombre d'enzymes PKS naturelles ou issues d'une mutation.

BIOINFORMATIQUE

La bioinformatique est un nouveau domaine pluridisciplinaire à cheval sur l'informatique, les mathématiques, la conception des ordinateurs et des logiciels et la biologie. Elle recouvre l'assemblage, le stockage, la consultation et l'analyse de bases de données informatiques (Benton, 1996). Les bases de données contiennent des séquences d'ADN, d'ARN et de protéines, des informations sur les structures macromoléculaires et un grand nombre de bases de données spécialisées qui donnent notamment des informations sur les phénotypes. Ces dernières fournissent des données taxonomiques, des voies métaboliques et des profils bidimensionnels d'électrophorèse sur gel de protéines cellulaires qui forment la base de la « protéomique » (voir plus bas). Les recherches sur le génome visent à l'établissement de cartes génétiques et de séquences d'ADN complètes d'organismes; cet objectif a été atteint pour la première fois en 1995 pour deux espèces de bactéries. Quatre séquences de génomes de micro-organismes supplémentaires ont été annoncées en 1996 et, d'ici à la fin du siècle, des dizaines de séquences devraient être élucidées. En outre, la cartographie et l'analyse de la séquence de diverses espèces animales et végétales progresse rapidement. L'un des projets concerne le génome humain.

Les données issues d'analyses du génome peuvent être mises à profit pour traiter diverses questions liées au pouvoir pathogène des micro-organismes, au fondement génétique des maladies humaines, à l'évolution des molécules et à l'exploitation biotechnologique d'organismes récemment découverts tels que les extrémophiles. On estime, par exemple, que la moitié de la population mondiale abrite la bactérie *Helicobacter pylori*, responsable de l'ulcère gastro-duodéal chez l'homme. La publication récente de la séquence d'ADN de l'*Helicobacter* (plus de 1.6 million de paires de bases nucléotidiques) apportera un éclairage nouveau sur son action pathogène et une aide substantielle aux efforts déployés par l'industrie pharmaceutique pour mettre au point des médicaments et des vaccins plus efficaces. La taille du génome humain est plus de 180 fois supérieure à celle du génome de la bactérie responsable de l'ulcère gastro-duodéal.

Parallèlement à l'étude du génome se développe celle de l'expression des gènes, quelquefois appelée « protéomique » (Wilkins *et al.*, 1995). Elle a pour but de définir l'assortiment complet des protéines exprimées par un génome, une cellule ou un type de tissu. Contrairement au génome

cellulaire qui est une entité fixe, cet assortiment est susceptible de varier selon les conditions qui prévalent et d'un tissu à l'autre au sein d'un même organisme. Par conséquent l'assortiment de protéines exprimées à un moment donné ou sous un ensemble de conditions déterminées donne une mesure de la physiologie de la cellule ou de l'organisme; autrement dit, il livre un instantané de son comportement. On estime que la levure de bière exprime 6 000 protéines, tandis que l'être humain en exprimerait entre 60 000 et 80 000. Chez la levure, environ la moitié des protéines ont été caractérisées; chez l'humain le chiffre correspondant ne dépasse pas 5 pour cent. Le grand défi à relever consiste donc à inventorier les différentes protéines et à définir ensuite leur structure et leur fonction. Ces analyses ouvriront d'énormes perspectives biotechnologiques et le premier but à atteindre concerne la définition des états pathologiques et l'identification subséquente d'objectifs pour la mise au point de médicaments. Ce type d'analyse se prête aussi bien aux maladies infectieuses qu'aux troubles génétiques.

Le champ d'application de la bioinformatique est tellement étendu que la recherche biologique elle-même pourrait bien passer de l'observation et de l'expérimentation traditionnelles à la « prospection de données », qui recourt aux technologies informatiques de pointe pour formuler et tester des hypothèses en « prospectant » les bases de données contenant des séquences de gènes et de protéines. Il s'ensuit que des expériences novatrices peuvent être menées *in silico* plutôt qu'*in vivo* ou *in vitro*, si bien qu'il n'est plus nécessaire d'accomplir que les expériences essentielles. Les bases de données du type requis connaissent un essor spectaculaire et la bioinformatique a fait un usage très efficace du World Wide Web pour porter rapidement de nouvelles données dans le domaine public. Diverses questions non scientifiques ayant des implications majeures pour la biotechnologie émergent à la suite de ce développement explosif. Les questions suivantes figurent parmi celles qui appellent un examen urgent :

- Comment les bases de données doivent-elles être tenues et gérées pour faire face à la demande croissante des utilisateurs?
- L'accès aux bases de données doit-il être contrôlé et si oui, comment?
- Comment établir les priorités de la recherche?
- Comment financer les bases de données?
- Quels sont les rôles des secteurs public et privé?
- Quelle formation faut-il mettre sur pied pour faire accéder la bioinformatique au statut de profession interdisciplinaire?

PRIORITÉS EN MATIÈRE DE RECHERCHE ET DE DÉVELOPPEMENT

Si la biotechnologie est appelée à devenir une source de plus en plus importante de produits et procédés industriels propres, les efforts de R-D devront porter sur plusieurs domaines prioritaires. Parmi ceux sur lesquels la recherche devrait se concentrer rapidement dans un avenir proche, citons :

- les produits innovants procédant de sources biologiques qui concourent à la viabilité écologique;
- l'exploration plus large des systèmes biologiques (enzymes, micro-organismes, cellules, organismes entiers);
- l'importance accrue à accorder à l'utilisation de cultures mixtes, notamment leur établissement et la mise au point de procédés de production et de dégradation fondés sur celles-ci;
- les nouvelles procédures pour la mise au point de procédés biologiques (conception de molécules biologiques, étude du génome);
- les technologies innovantes relatives à l'utilisation des biocatalyseurs dans des domaines où les biocatalyseurs classiques n'ont pas encore été exploités (par exemple, l'industrie pétrochimique);
- les procédés de recyclage biologique qui convertissent les ressources inutilisées en substances utiles;

- l'importance à accorder à l'ingénierie, notamment l'ingénierie des procédés à grande échelle, l'intensification des procédés, la mesure, les systèmes de surveillance et de contrôle;
- l'importance plus grande à accorder à la biodiversité et l'élargissement de la recherche de nouveaux gènes (bioprospection); parallèlement à cette démarche, il sera nécessaire de construire des infrastructures telles que des collections de culture et des bases de données biologiques exhaustives, et de développer la bioinformatique;
- la mise au point et l'application de la technologie des recombinaisons génétiques.

Étude de cas 3.1

AUTHENTICITÉ DE PRODUITS ISSUS D'UNE RECOMBINAISON : LA MODIFICATION POST-TRADUCTIONNELLE DE L'INTERFÉRON- γ HUMAIN

De nombreuses protéines présentant un intérêt en médecine humaine subissent des modifications structurales après la traduction de leur ARN messager ; ces modifications comportent la glycosylation (addition de sucres) et la scission partielle de la protéine. Lorsque ces protéines sont produites par la technologie de l'ADN recombiné, il est essentiel qu'elles soient aussi proches que possible de la version humaine authentique. Les variations de la structure de la protéine ont des implications profondes pour l'industrie pharmaceutique, où la présence et la structure des chaînes latérales de sucres, par exemple, sont susceptibles d'affecter la clairance à travers le corps humain, l'activité biologique désirée et l'immunogénicité de la protéine. La qualité des protéines issues d'une recombinaison est influencée par de nombreux facteurs, parmi lesquels le type de cellule hôte utilisé pour la production (cellule de micro-organisme, d'insecte ou de mammifère) et les conditions ambiantes appliquées à la culture des cellules. L'interféron gamma humain (Hu-IFN- γ) obtenu par recombinaison est l'une des protéines étudiées en grand détail dans ce contexte.

Hu-IFN- γ active les macrophages au cours d'une réponse immunitaire et manifeste une activité antivirale puissante. Cette protéine est formée d'une chaîne de 143 acides aminés, et des chaînes latérales d'oligosaccharides peuvent s'y rattacher à la hauteur des résidus asparagine occupant les positions 25 et 97 sur la molécule. Lorsque Hu-IFN- γ résulte d'une recombinaison dans des cellules de mammifère, on observe une hétérogénéité primaire ou macro-hétérogénéité, du fait que les deux, un seul ou aucun des deux résidus asparagine peuvent être glycosylés. Une hétérogénéité supplémentaire du produit recombiné résulte de variations quant au nombre et à la séquence des sucres formant les chaînes latérales d'oligosaccharides ; on parle alors de micro-hétérogénéité. Plus de 30 glycoformes (variantes moléculaires engendrées par ces micro- et macro-hétérogénéités) ont été détectées dans des cultures de cellules d'ovaire de hamster chinois produisant le Hu-IFN- γ par recombinaison. Enfin, le troisième facteur d'hétérogénéité provient de la protéolyse de l'extrémité carbonée de la protéine qui peut enlever jusqu'à dix résidus d'acides aminés et donner lieu à un produit tronqué. Aussi, le produit issu de la recombinaison peut être composé d'un mélange extrêmement complexe de molécules de Hu-IFN- γ . Ces données sont déterminantes pour définir le stade optimal de la récolte dans les cultures de cellules animales, en vue d'obtenir le produit le plus authentique. On dispose désormais de techniques très sophistiquées et sensibles pour surveiller la qualité de la protéine. Évaluer et contrôler la qualité de la protéine au cours du procédé de production, afin d'obtenir le produit le plus efficace, représentent actuellement des tâches importantes qui incombent à l'ingénieur du procédé biologique.

Étude de cas 3.2

**FABRICATION DU PAPIER A L'AIDE DE PRODUITS CHIMIQUES MOINS NOCIFS
POUR L'ENVIRONNEMENT**

La fabrication de résines de poly(aminoamide) utilisées pour conférer une résistance à l'état humide au papier et au carton d'emballage fait intervenir des dérivés de l'épichlorhydrine. La polymérisation engendre des haloalcools indésirables, principalement du 1.3-dichloropropanol (DCP) et du 3-chloropropanediol (CPD), qui s'accumulent dans le flux de produits. Diverses stratégies ont été envisagées pour enlever ces haloalcools, notamment une modification du procédé et des traitements physico-chimiques. On est néanmoins parvenu à mettre au point une étape biotechnologique susceptible d'être incorporée au procédé de fabrication existant et ne nuisant pas aux propriétés de la résine à l'état humide, en maîtrisant les activités d'une culture mixte déshalogénante.

La culture mixte sélectionnée a été obtenue à l'aide d'un enrichissement par isolement et se compose de deux espèces de bactéries, *Arthrobacter histidinovorans* et *Agrobacterium tumefaciens*. Ces deux espèces sont capables de minéraliser le DCP et le CPD, mais elles agissent en synergie pour éliminer ces composés lorsqu'elles opèrent dans un procédé en continu. Afin de permettre la croissance de la culture mixte, le flux de résine a été additionné de faibles concentrations de phosphate et d'urée. Dans un procédé en continu, le rapport *Arthrobacter* sur *Agrobacterium* est de 1:4, et cette culture mixte est demeurée stable durant une période allant jusqu'à cinq mois dans des cuves de réacteur agitées, à l'échelle du laboratoire. Lorsque ce rapport était porté à moins de 50 pour cent d'*Agrobacterium*, on constatait une montée du DCP dans le flux de produits. De même, des perturbations provoquant une dominance complète d'*Agrobacterium* entraînaient une forte élévation du CPD. Toutefois, le caractère dynamique du système ramenait le rapport à une valeur optimale pour la déshalogénéation, si on donnait au réacteur la possibilité de corriger la perturbation.

Le procédé conduit à l'échelle du laboratoire a été porté à plus grande échelle et intégré dans une installation existante (3 m³) fabricant de la résine résistante à l'état humide, où le total des haloalcools a été abaissé d'environ 8 000 ppm à moins de 6 ppm, pour un temps de transit dans le procédé de 6.8 heures. Il est important de noter que le procédé a été introduit dans une installation chimique où aucun système biologique n'avait été incorporé auparavant; le scepticisme initial à propos de la fragilité et du manque de fiabilité supposés de la biotechnologie a été vaincu et ce procédé biologique fondé sur l'emploi en continu d'une culture mixte septique s'est avéré extrêmement robuste et capable de répondre aux variations des exigences de la production.

BIBLIOGRAPHIE

- ALLENBY, B.R. (1994), «Integrating Environment and Technology: Design for Environment», dans B.R. Allenby et D.J. Richards (éd.), *The Greening of Industrial Ecosystems*, pp. 137-148, National Academy Press, Washington, DC.
- ARNOLD, F.H. (1996), «Directed Evolution: Creating Biocatalysts for the Future», *Chem. Eng. Sci.* 51, pp. 5091-5102.
- BENTON, D. (1996), «Bioinformatics – Principles and Potential for a New Multidisciplinary Tool», *TIBTECH* 14, pp. 261-272.
- BICKERSTAFF, G.F. (1995), «Impact of Genetic Technology on Enzyme Technology», *The Genetic Engineer and Biotechnologist*, vol. 15:1, Journals Oxford Ltd.
- BULL, A.T., G. HOLT et M.D. LILLY (1982), *Biotechnologie. Tendances et perspectives internationales*, OCDE, Paris.
- BULL, A.T. et J.H. SLATER (1982), *Microbial Interactions and Communities*, Academic, Londres.
- CRAMERI, A., G. DAWES, E. RODRIGUEZ, S. SILVER et W.C.P. STEMMER (1997), «Molecular Evolution of an Arsenate Detoxification Pathway by DNA Shuffling», *Nat. Biotechnol.* 15, pp. 436-438.
- FUQUA, C., S.C. WINANS, et E.P. GREENBERG (1996), «Census and Consensus in Bacterial Ecosystems: The LuxR and LuxI Families of Quorum-sensing Transcriptional Regulators», *Annu. Rev. Microbiol.* 50, pp. 727-751.
- GOLDMAN, M.H., D.C. JAMES, A.P. ISON et A.T. BULL (1997), «Monitoring Proteolysis of Recombinant Human Interferon-gamma during Batch Culture of Chinese Hamster Ovary Cells», *Cytotechnol.* 23, pp. 103-111.
- GRAY, K.M. (1997), «Intercellular Communication and Group Behaviour in Bacteria», *Trends Microbiol.* 5, pp. 184-188.
- HARDMAN, D.J., M. HUXLEY, A.T. BULL, J.H. SLATER et R. BATES (1997), «Generation of Environmentally Enhanced Products: Clean Technology for Paper Chemicals», *J. Chem. Tech. Biotechnol.* 70, pp. 60-66.
- HOOKE, A.D., M.H. GOLDMAN, N.H. MARKHAM, D.C. JAMES, A.P. ISON, A.T. BULL, P.G. STRANGE, I. SALMON, A.J. BAINES et N. JENKINS (1995), «N-Glycans of Recombinant Human Interferon-gamma Change during Batch Culture of Chinese Hamster Ovary Cells», *Biotechnol. Bioengng.* 48, pp. 639-648.
- KAMAT, S.V., E.J. BECKMAN et A.J. RUSSELL (1995), «Enzyme Activity in Supercritical Fluids», *Crit. Rev. Biotechnol.* 15, pp. 41-71.
- KLEERBEZEM, M., QUADRI LEN, O.P. KUIPERS et W.M. DE VOS (1997), «Quorum Sensing by Peptide Pheromones and Two-component Signal-transduction Systems in Gram-positive Bacteria», *Molec. Microbiol.* 24, pp. 895-904.
- KUCHNER, O. et F.H. ARNOLD (1997), «Directed Evolution of Enzyme Catalysts», *TIBTECH* 15, pp. 523-530.
- KURANE, R. et H. MATSUYAMA (1994), «Production of Bioflocculant by Mixed Culture», *Biosci. Biotechnol. Biochem.* 58, pp. 1589-1594.
- KURANE, R., K. HATAMOCHI, T. KAKUNO, M. KIYOHARA, K. KAWAGUCHI, Y. MIZUNO, M. HIRANO et Y. TANGUCHI (1994), «Purification and Characterization of Lipid Bioflocculant Produced by *Rhodococcus Erythropolis*», *Biosci. Biotechnol. Biochem.* 58, pp. 1977-1982.
- McDANIEL, R., S. EBERT-KHOSLA, D.A. HOPWOOD et C. KHOSLA (1995), «Rational Design of Aromatic Polyketide Natural Products by Recombinant Assembly of Enzymatic Units», *Nature* 375, pp. 549-553.
- MOORE, J.C. et F.H. ARNOLD (1996), «Directed Evolution of a Para-nitrophenyl Esterase for Aqueous-organic solvents», *Nature Biotechnol.* 14, pp. 458-467.
- MORITZ, J.W. et S.J.B. DUFF (1996), «Simultaneous Saccharification and Extractive Fermentation of Cellulosic Substrates», *Biotechnol. Bioengng.* 49, pp. 504-511.
- NOVO NORDISK A/S (1996), *Environmental Report*, Bagsvaerd, Danemark.
- OCDE (1986), *Recombinant DNA Safety Considerations*, OCDE, Paris.
- ROBSON, N.D., A.R.J. COX, S.J. MCGARAN, B.W. BYCROFT et G.P.C. SALMOND (1997), «Bacterial N-acyl-homoserine-lactone-dependent Signalling and its Biotechnological Potential», *TIBTECH* 15, pp. 458-464.

- SMITH, J. (éd.) (1996), *L'avenir des biotechnologies en Europe – De la recherche-développement à la compétitivité de l'industrie*, Club de Bruxelles, contribution à la conférence organisée par le Club de Bruxelles les 26 et 27 septembre 1996, à Bruxelles, Belgique.
- STRANSBERG, S.L., P.A. ALEXANDER, D.T. GALLAGHER, G.L. GILLIAND, B.L. BARNETT et P.N. BUNYAN (1995), «Directed Evolution of a Subtilisin with Calcium-independent Stability», *Bio/Technol.* 13, pp. 669-672.
- WIESNER, J. (1995), «Production-integrated Environmental Protection», *Ullmann's Encycl. Ind. Chem.* B8, pp. 213-309.
- WILKINS, M.R., J.C. SANCHEZ, A.A. GOOLEY, R.D. APPEL, I. HUMPHREY-SMITH, D.F. HOCHSTRASSER et K.L. WILLIAMS (1995), «Progress With Proteome Projects: Why All Proteins Expressed by a Genome Should be Identified and How To Do It», *Biotechnol. Genet. Engng. Rev.* 13, pp. 19-50.
- ZAKS, A. et A.M. KLIBANOV (1988), «The Effect of Water on Enzyme Action in Organic Media», *J. Biol. Chem.* 263, p. 3194.
- ZHANG, J.H., G. DAWES et W.P.C. STEMMER (1997), «Directed Evolution of a Fucosidase from a Galactosidase by DNA Shuffling and Screening», *Proc. Nat. Acad. Sci. USA* 94, pp. 4504-4509.

ÉVALUATION DE LA PROPRETÉ DES PRODUITS ET PROCÉDÉS BIOTECHNOLOGIQUES INDUSTRIELS*

- Parmi les divers instruments permettant d'évaluer la propreté des activités industrielles, l'analyse du cycle de vie (ACV) est la principale méthode pour évaluer l'impact total de produits ou de procédés sur l'environnement.
- L'ACV porte sur le cycle de vie complet d'une activité industrielle.
- L'ACV intègre quatre éléments distincts : la définition de la portée et des objectifs, l'analyse de l'inventaire, l'évaluation de l'impact (y compris la pondération) et l'interprétation.
- Il y a lieu d'harmoniser à l'échelon international les méthodes d'évaluation de la propreté, y compris la définition des limites du système.
- L'ACV a servi à vérifier le degré de propreté de technologies concurrentes; les quelques analyses qui ont été effectuées sur des procédés biotechnologiques plaident en faveur de leur propreté.

INTRODUCTION

Les produits et procédés comportent un risque potentiel, en ce sens qu'ils peuvent porter atteinte à la santé humaine et/ou à l'environnement. Toutes les étapes d'un procédé, à savoir l'extraction des matériaux, leur transformation, la fabrication du produit, son utilisation et la gestion des déchets après l'utilisation du produit, doivent être prises en compte dans l'évaluation de l'impact sur l'environnement.

Il existe plusieurs outils pour évaluer l'incidence de produits et procédés techniques sur l'environnement (tableau 4.1). Si l'on veut évaluer à la fois les dommages sur l'environnement local et la charge polluante totale sur l'environnement planétaire, il conviendra de recourir à des outils adaptés à cette fin.

Les *systèmes de gestion de l'environnement* sont axés sur l'audit des systèmes de gestion, et dans une certaine mesure sur la performance environnementale des organisations et des entreprises. Deux procédures sont reconnues au niveau international. Le Système communautaire de management environnemental et d'audit (EMAS) de l'Union européenne (Règlement CEE n° 1836/93) est une procédure propre au site, visant l'amélioration continue du système de gestion de l'environnement et des techniques utilisées pour protéger l'environnement. L'Organisation internationale de normalisation (ISO) a émis une série de réglementations (ISO 14001 et suivantes) applicables à l'audit de la gestion environnementale des organisations et des entreprises. Les réglementations ISO ne sont pas limitées au contexte particulier d'un site et couvrent le génie de l'environnement de façon plus indirecte. Les systèmes de gestion de l'environnement ne se prêtent pas à l'évaluation détaillée des impacts sur l'environnement, qui est accomplie par d'autres moyens.

L'*évaluation des risques* consiste à calculer la probabilité que les limites imposées par la sécurité de l'environnement soient dépassées ou que des effets préjudiciables se produisent. Elle intègre habituellement le degré de vulnérabilité de l'environnement et l'intensité de la perturbation affectant cet

* Ce chapitre a été rédigé sous la responsabilité du Dr W. Crueger, Bayer AG – WV Umweltschutz (Allemagne), avec la collaboration des personnes suivantes : Dipl.-Ing. H. Beddies, Prof. Dr J. Jager, Dipl.-Ing. R. Pant, Dipl.-Volksw. F. Rubik, Dipl.-Kfm. O. Wolf et Dr D. Sell.

ÉVALUATION DE LA PROPRETÉ DES PRODUITS ET PROCÉDÉS BIOTECHNOLOGIQUES INDUSTRIELS*

- Parmi les divers instruments permettant d'évaluer la propreté des activités industrielles, l'analyse du cycle de vie (ACV) est la principale méthode pour évaluer l'impact total de produits ou de procédés sur l'environnement.
- L'ACV porte sur le cycle de vie complet d'une activité industrielle.
- L'ACV intègre quatre éléments distincts : la définition de la portée et des objectifs, l'analyse de l'inventaire, l'évaluation de l'impact (y compris la pondération) et l'interprétation.
- Il y a lieu d'harmoniser à l'échelon international les méthodes d'évaluation de la propreté, y compris la définition des limites du système.
- L'ACV a servi à vérifier le degré de propreté de technologies concurrentes; les quelques analyses qui ont été effectuées sur des procédés biotechnologiques plaident en faveur de leur propreté.

INTRODUCTION

Les produits et procédés comportent un risque potentiel, en ce sens qu'ils peuvent porter atteinte à la santé humaine et/ou à l'environnement. Toutes les étapes d'un procédé, à savoir l'extraction des matériaux, leur transformation, la fabrication du produit, son utilisation et la gestion des déchets après l'utilisation du produit, doivent être prises en compte dans l'évaluation de l'impact sur l'environnement.

Il existe plusieurs outils pour évaluer l'incidence de produits et procédés techniques sur l'environnement (tableau 4.1). Si l'on veut évaluer à la fois les dommages sur l'environnement local et la charge polluante totale sur l'environnement planétaire, il conviendra de recourir à des outils adaptés à cette fin.

Les *systèmes de gestion de l'environnement* sont axés sur l'audit des systèmes de gestion, et dans une certaine mesure sur la performance environnementale des organisations et des entreprises. Deux procédures sont reconnues au niveau international. Le Système communautaire de management environnemental et d'audit (EMAS) de l'Union européenne (Règlement CEE n° 1836/93) est une procédure propre au site, visant l'amélioration continue du système de gestion de l'environnement et des techniques utilisées pour protéger l'environnement. L'Organisation internationale de normalisation (ISO) a émis une série de réglementations (ISO 14001 et suivantes) applicables à l'audit de la gestion environnementale des organisations et des entreprises. Les réglementations ISO ne sont pas limitées au contexte particulier d'un site et couvrent le génie de l'environnement de façon plus indirecte. Les systèmes de gestion de l'environnement ne se prêtent pas à l'évaluation détaillée des impacts sur l'environnement, qui est accomplie par d'autres moyens.

L'*évaluation des risques* consiste à calculer la probabilité que les limites imposées par la sécurité de l'environnement soient dépassées ou que des effets préjudiciables se produisent. Elle intègre habituellement le degré de vulnérabilité de l'environnement et l'intensité de la perturbation affectant cet

* Ce chapitre a été rédigé sous la responsabilité du Dr W. Crueger, Bayer AG – WV Umweltschutz (Allemagne), avec la collaboration des personnes suivantes : Dipl.-Ing. H. Beddies, Prof. Dr J. Jager, Dipl.-Ing. R. Pant, Dipl.-Volksw. F. Rubik, Dipl.-Kfm. O. Wolf et Dr D. Sell.

Tableau. 4.1. **Comparaison de différents instruments d'évaluation de l'impact sur l'environnement**

| Instrument | Objet | Perspective temporelle | Perspective spatiale | Niveau d'application : entrées ou sorties | Éléments méthodologiques | Effets examinés | Données requises |
|--|--|--|--|---|---|--|--|
| Systèmes de gestion de l'environnement | Gestion environnementale des entreprises | Rétrospective et prospective | Site/zone définis | Entrées et sorties | Audit du système de gestion et performance environnementale de l'entreprise | Atténuation des effets sur l'environnement | Données environnementales, sociales |
| Évaluation des risques | Substance/activité dangereuse | Rétrospective et prospective | Site/zone/ substance définis | Sorties | Dispersion, effet de la dose, probabilité des effets néfastes | Effets toxiques sur la santé humaine et les cibles dans l'environnement | Données environnementales, propriétés des substances |
| Évaluation de la technologie | Technologies | Prospective | Particulière au site | Sorties | Probabilité des effets néfastes sur l'environnement | Tous les effets sur l'environnement local et écologique | Données environnementales, sociales, techniques |
| Étude d'impact sur l'environnement (EIE) | Projet | Prospective | Site/zone définis | Entrées et sorties | Dispersion, effet de dose et autres | Tous les effets sur l'environnement local, social et écologique | Environnementales, économiques |
| Analyse des flux massiques | Produit/ substance/masse totale | Rétrospective et prospective (temps : un an) | Région définie ou planète | Entrées et sorties | Répartition, bilan massique, dispersion | N'est pas axée sur les effets | Procédés, propriétés des substances, masses dans l'environnement |
| Analyse du cycle de vie (ACV) | Produit/service | Rétrospective et prospective | N'est pas particulière au site, planétaire | Entrées et sorties | Répartition, bilan massique, dispersion, effet de dose | Ensemble des impacts potentiels de l'extraction et des émissions sur l'environnement | Procédé, données environnementales |

Source : Adapté de Wisberg, 1997b.

environnement. Elle est souvent utilisée pour estimer le risque d'effets néfastes sur la santé humaine et l'environnement, associés à des activités ou à des substances dangereuses, par exemple l'utilisation de produits chimiques toxiques. La concentration prévue dans l'environnement (CPE) d'une substance est comparée à la sensibilité de l'écosystème (concentration sans effet, CSE) au moyen du rapport CPE/CSE. La CPE peut être décrite par une seule valeur, par exemple la concentration moyenne de la substance dangereuse, ou par une variation de sa concentration dans l'espace et dans le temps. Il est essentiel de connaître le moment et le lieu d'une activité afin de déterminer l'intensité probable de la perturbation et les caractéristiques de l'environnement pollué. L'évaluation des risques ne s'applique pas aux problèmes d'environnement de portée mondiale, tels que l'effet de serre, et ne couvre pas la totalité du cycle de vie d'un produit ou d'un service.

L'évaluation de la technologie est un outil prévisionnel, qui révèle la probabilité des effets sociaux, économiques et environnementaux associés à des technologies, par exemple la production électronucléaire. L'évaluation de la technologie vise à établir un système d'alerte rapide permettant de détecter, de contrôler et d'orienter les changements et évolutions technologiques afin de privilégier au maximum l'intérêt public et de réduire au minimum les risques pour la population. Dans le contexte de l'évaluation de la technologie, on considère l'évolution technique comme un processus social qui doit être guidé par des décisions politiques destinées à favoriser au maximum le bien-être de la population. Il faut commencer par définir l'objectif et le système. Après avoir analysé en détail et établi la structure des zones susceptibles d'être affectées, on détermine et évalue la nature et le degré des impacts potentiels. Pour finir, diverses options sont examinées. L'évaluation de la technologie sert à étayer les prises de décision au niveau politique.

L'étude d'impact sur l'environnement (EIE) consiste à mettre en évidence et à évaluer les répercussions locales, sur l'environnement physique et social, d'un projet ou d'une activité spécifiques, par exemple la construction d'une nouvelle installation de production. Elle permet d'effectuer, pour un site particulier, une évaluation prospective très détaillée des effets sur l'environnement. Toutes les composantes de l'environnement local (l'air, l'eau, le sol, les écosystèmes et leurs effets réciproques) sont évaluées. L'EIE comprend plusieurs étapes analogues à celles de l'évaluation de la technologie. Un rapport d'évaluation préliminaire précise si l'EIE est nécessaire. L'objectif et le degré d'approfondissement de l'évaluation sont indiqués dans la définition de la portée. Les impacts potentiels sur l'environnement sont répertoriés et estimés. La décision d'octroyer un permis pour un projet donné et la formulation des mesures visant à réduire au minimum les incidences de ce projet sur l'environnement composent la dernière étape. L'EIE, qui est centrée sur les projets, ne couvre pas toutes les étapes du cycle de vie d'un produit ou d'un service.

L'analyse des flux massiques permet de chiffrer les transferts de masses qui sortent d'un milieu et le traversent durant une certaine période, dans une région économique particulière. Elle révèle aussi les sources de consommation des ressources et de pollution, ainsi que les puits, dans une région définie. L'analyse des flux massiques livre simplement l'inventaire des entrées et des sorties sans prévoir les impacts potentiels ni même réels de ces flux sur l'environnement. Dans une première étape, le système est défini et décrit d'après les produits, les procédés, ou une ou plusieurs substances. Après avoir mesuré les flux de produits et les substances qu'ils renferment, on calcule les flux massiques. Les lois de conservation de l'énergie et de la matière s'appliquent. L'étape finale fournit une représentation graphique systématique et une interprétation des résultats. Cette méthode permet d'identifier les procédés associés à une gestion pertinente des flux massiques.

L'analyse du cycle de vie (ACV) évalue les impacts potentiels sur l'environnement des produits ou des services sur la totalité de leur cycle de vie (« du berceau à la tombe »). L'ACV se place d'un point de vue global. Elle ne tient pas compte du lieu ni du moment où un produit est fabriqué, utilisé ou éliminé. Les émissions et l'extraction des substances visées sont enregistrées et évaluées en fonction des quantités totales en jeu. L'ACV indique l'intensité des pressions qui s'exercent sur l'environnement, sans préciser les concentrations émises ni leurs variations. Elle est souvent utilisée pour faire apparaître les étapes qui comportent le risque le plus élevé dans le cycle de vie d'un produit et pour décider quelle solution de remplacement présente l'impact potentiel le plus faible sur l'environnement. On consigne les effets potentiels, étant donné qu'il est impossible d'obtenir les données

permettant de prévoir les retombées réelles sur l'environnement. Les effets potentiels peuvent donner une indication des effets réels. L'ACV s'inscrit dans le cadre de la «gestion responsable» (voir encadré 4.1).

Encadré 4.1. Gestion responsable

Définie pour la première fois par l'industrie chimique, la gestion responsable représente l'engagement pris par l'industrie chimique mondiale d'améliorer continuellement tous les aspects ayant trait à la santé, à la sécurité et à l'environnement, et de faire preuve de transparence dans ses communications à propos de ses activités et de ses réalisations. Aujourd'hui, la plupart des autres industries élaborent aussi des programmes de gestion responsable.

Les associations qui représentent les industries chimiques au niveau national sont chargées de mettre en œuvre les détails pratiques de la gestion responsable dans leurs pays respectifs et chaque programme de gestion responsable comprend les éléments fondamentaux suivants :

- un engagement formel, de la part de chaque entreprise, à respecter un ensemble de principes directeurs, signé dans la plupart des cas par le directeur général;
- une série de codes, de lignes directrices et de listes de contrôle servant à aider les entreprises à s'acquitter de leur engagement;
- la mise au point progressive d'indicateurs permettant de mesurer l'amélioration des résultats en matière d'environnement;
- un dispositif permanent de communication de données concernant la santé, la sécurité et l'environnement, aux parties concernées en dehors de l'industrie;
- la fourniture d'infrastructures permettant aux entreprises de partager leurs points de vue et d'échanger des données d'expérience à propos de l'application de leur engagement;
- l'adoption d'un titre et d'un logo identifiant clairement les programmes nationaux conformes aux principes de la gestion responsable;
- l'étude de la meilleure manière d'encourager toutes les entreprises membres à s'engager et à participer à la gestion responsable.

Les programmes de gestion responsable des différents pays sont à divers stades de développement et suivent différentes tendances.

La gestion responsable peut inclure :

- la responsabilité du fait du produit;
- le dialogue;
- la protection de l'environnement;
- la sécurité sur le lieu de travail;
- la sécurité des installations et la gestion des risques;
- la sécurité du transport.

L'ACV représente actuellement la méthode d'évaluation la plus appréciée pour estimer la propreté des procédés industriels. C'est la meilleure méthode pour déterminer l'accroissement du degré de propreté qui peut être obtenu grâce aux procédés biotechnologiques.

Lorsqu'il s'agit de procéder à l'évaluation critique de produits et de procédés industriels du point de vue de leur viabilité écologique, l'attrait de l'ACV procède du fait qu'elle :

- se fonde sur le cycle de vie des produits et des systèmes;
- décrit les effets produits sur l'écosystème;
- permet d'optimiser les processus du point de vue de l'environnement, notamment par une rétroaction entre différentes étapes du cycle de vie;
- autorise une comparaison objective ou équitable des systèmes écologiques;
- permet une communication plus aisée et objective sur les problèmes d'environnement.

- Les ACV ont aussi leurs limites, qui ne doivent pas être négligées. Elles ne permettent pas :
- de déterminer l'impact global d'un produit ou d'un groupe de produits sur l'environnement;
 - d'évaluer des paramètres tels que la disponibilité et la capacité de renouvellement des matières premières;
 - de comparer des produits fabriqués à différentes fins et/ou dans différentes conditions;
 - de formuler des généralisations sur les méthodes d'élimination;
 - d'arrêter des décisions (bien qu'elles puissent faciliter la tâche des décideurs).

Bien que l'ACV ait été mise au point il y a vingt-cinq ans, elle n'a guère eu jusqu'à présent d'impact sur les procédés biologiques et les produits qui en résultent. Ce n'est que récemment que des efforts concertés ont été déployés en vue d'harmoniser les méthodes afin de renforcer la crédibilité de l'ACV et la confiance qu'elle inspire. L'application de l'ACV, notamment par les petites entreprises, risque d'être entravée par des contraintes de coût et de temps et par la quantité de ressources nécessaires pour analyser des produits complexes. Les calculs relatifs à l'inventaire sont malaisés du fait que les entrées d'énergie et de matières premières et les sorties de déchets font généralement intervenir plusieurs entreprises et qu'il risque d'être impossible d'obtenir les données nécessaires.

L'impact d'un produit ou d'un procédé sur l'environnement est une préoccupation fondamentale. Pour l'évaluer, il est nécessaire de déterminer les informations requises, les moyens de les obtenir et leur degré de fiabilité. Les objectifs à ne pas perdre de vue sont la préservation ou l'utilisation rationnelle des ressources naturelles, et la réduction ou l'optimisation de la pollution due aux émissions et aux déchets. Ces objectifs ont trait au rôle de l'environnement en tant que source et que puits, et englobent la réduction au minimum de la pollution et son optimisation dans les cas où la réduction au minimum d'un paramètre est corrélée à l'accroissement d'un autre. C'est précisément à l'égard de ce type de considérations que l'importance des ACV se manifeste.

ANALYSE DU CYCLE DE VIE

L'ACV a pour objet d'éclairer le processus de décision des entreprises et des pouvoirs publics en matière de fixation des priorités, de planification stratégique et de mise au point des produits et de procédés. L'ACV se borne à décrire les aspects écologiques d'une activité. Elle ne couvre pas les paramètres socio-politiques et économiques, bien qu'ils aient une importance égale dans les décisions prises par les pouvoirs publics et l'industrie. Les résultats des ACV devraient être présentés de façon à permettre aux décideurs de mettre en balance les divers aspects environnementaux, économiques et sociaux, et le type de données communiquées aux décideurs devrait être adapté à leurs besoins. Toutefois, si pour des raisons techniques ou économiques, un produit possède des avantages écrasants sur ses concurrents, l'ACV ne sera généralement pas nécessaire.

L'ACV se déroule en quatre étapes : la définition de l'objectif et de la portée (y compris la définition des limites du système), l'analyse de l'inventaire, l'évaluation de l'impact (y compris la pondération), et l'interprétation. (Pour un exposé détaillé des modalités d'application de l'ACV, se reporter à l'annexe 4.1). Comme les retombées sur l'environnement examinées à travers l'ACV concernent la totalité du cycle de vie d'un produit, il y a lieu de déterminer et d'évaluer les effets potentiels sur la santé humaine, l'environnement et l'utilisation des ressources naturelles, depuis l'acquisition des matières premières jusqu'à l'élimination en passant par la production et l'utilisation. Le cadre méthodologique, qui fait l'objet d'une large adhésion, a été incorporé dans les projets de normes ISO (voir l'annexe 4.2).

Si l'ACV est appelée à devenir le principal instrument d'analyse au service de l'évaluation de la propreté des opérations industrielles, elle devra acquérir une légitimité (crédibilité des méthodes et des conclusions) et faire l'objet d'une harmonisation internationale. Les grandes divergences entre les politiques énergétiques des États membres de l'Union européenne, par exemple, illustrent la difficulté. A cet égard, les travaux menés actuellement par la Société de chimie et de toxicologie environnementales (*Society of Environmental Toxicology and Chemistry* - SETAC) et l'ISO sont capitaux. Le Comité technique 207 de l'ISO, chargé d'élaborer des normes en matière de gestion de l'environnement, coiffe un sous-comité (SC5) dévolu à l'ACV (ISO 14040, 1997).

Objectif et portée : définir les limites et l'analyse de l'inventaire

La première tâche consiste à définir l'objectif et la portée de l'ACV et à adapter l'évaluation à son application. Les résultats d'une ACV peuvent répondre à une plus grande exigence lorsque les études sont destinées à peser dans des prises de décision politiques, susceptibles d'avoir des conséquences majeures pour les secteurs économiques concernés, que lorsqu'elles sont menées pour dégager les points faibles à l'intérieur d'une entreprise.

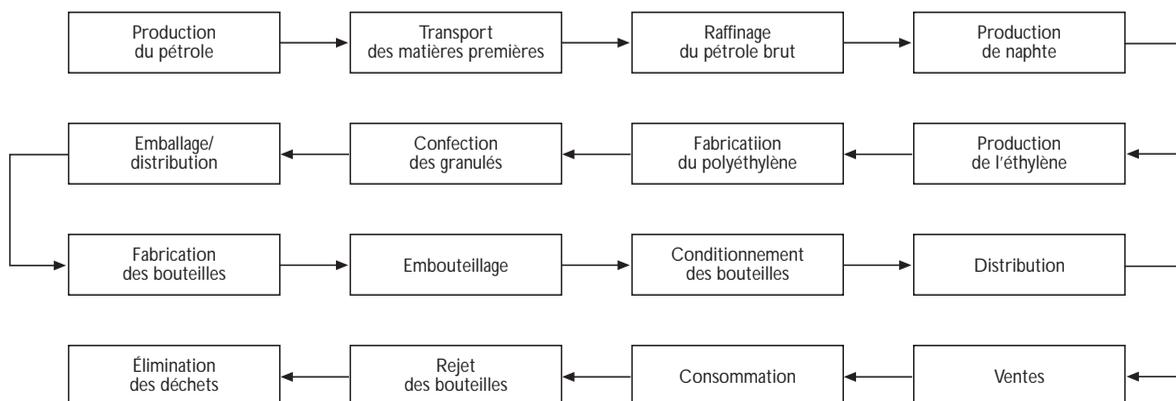
Les limites du système forment l'interface entre la filière du produit examiné et l'environnement ou d'autres filières de produits (ISO 14041, 1997). Elles dépendent de nombreux facteurs, tels que l'application, le groupe cible, les hypothèses posées, les critères de seuil, les données et les impératifs financiers. Comme ces limites sont susceptibles d'avoir une incidence sensible sur le résultat de l'ACV, les critères utilisés pour les déterminer doivent être décrits en détail.

Avant de comparer les filières de produits, il faut d'abord vérifier leur comparabilité et, pour ce faire, adopter la même portée et les mêmes paramètres (unité fonctionnelle, limites du système, qualité des données, procédures d'attribution, critères pour évaluer les flux entrants et sortants et critères d'évaluation de l'impact).

On dresse un inventaire en recensant les données concernant les entrées et sorties pertinentes (par exemple, utilisation de l'énergie et des ressources, émissions dans les milieux de l'environnement : eau, sol, air). Il convient d'être très prudent lorsqu'on fait des comparaisons sans avoir évalué l'impact au préalable, étant donné que les résultats d'un inventaire prouvent rarement la supériorité absolue d'un système.

L'analyse exhaustive du cycle de vie d'un produit doit tenir compte non seulement des flux de masse et d'énergie associés à l'acquisition des matières premières et aux procédés de production, mais aussi de ceux associés au transport, à l'utilisation et à l'élimination. La figure 4.1 montre, par exemple, les nombreux éléments entrant dans le cycle de vie d'un produit relativement simple tel qu'une bouteille de polyéthylène.

◆ Figure 4.1. *Le cycle de vie d'une bouteille de polyéthylène*



Source : SETAC, 1993a.

Il n'est pas toujours possible de faire la distinction entre la pollution engendrée par différentes filières de produits, si bien qu'il est difficile d'attribuer différents types de pollution aux différentes filières. De même, les flux de matières d'un procédé étudié peuvent ne pas quitter le système sous forme de déchets, mais être utilisés dans un deuxième procédé non étudié.

En pratique, la récolte des données, qui est une tâche très laborieuse, se heurte souvent à des limites. Au cours d'une ACV, les données manquantes et/ou la limitation de l'accès aux données, et le manque de temps et de moyens peuvent donner lieu à une mesure incomplète des entrées et des sorties. Il faudra donc statuer sur les procédés à examiner et sur le niveau de détail de leur étude.

Évaluation de l'impact

La définition de l'objectif et de la portée est la plus facile des quatre étapes d'une ACV et la méthode d'inventoriage suscite une adhésion croissante, bien qu'il subsiste quelques questions non résolues concernant les méthodes et des aspects pratiques.

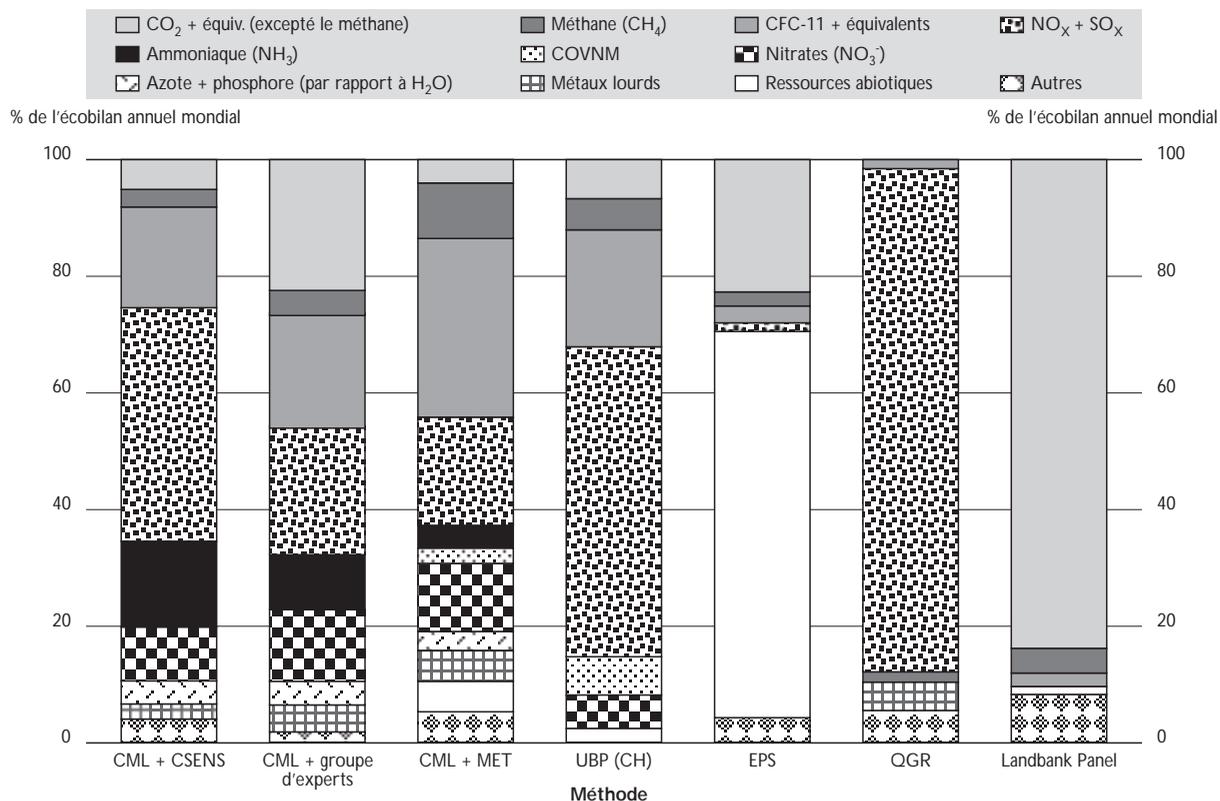
Il n'en va pas de même de l'évaluation de l'impact (ISO 14042, 1997). Ces dernières années, de nombreuses méthodes d'évaluation des impacts ont vu le jour. L'évaluation de l'impact consiste à examiner les données (flux massiques et énergétiques, rejets dans l'environnement, etc.) et à estimer les retombées probables de tous ces éléments sur l'environnement. On considère généralement que les domaines à protéger sont la santé humaine, l'environnement naturel et les ressources. Lorsque c'est possible, on s'efforce d'évaluer l'impact du cycle de vie du point de vue quantitatif. Dans certains cas toutefois, on pourra recourir à des jugements de valeur pour définir des catégories et élaborer des modèles de catégories.

La pondération consiste à attribuer une importance relative aux facteurs inclus dans l'ACV. Elle représente un élément essentiel de l'ACV et permet de comparer des systèmes à travers les catégories. La pondération est l'aspect le plus controversé de l'ACV car elle ne s'appuie pas sur des règles vérifiées scientifiquement et/ou largement reconnues. Elle est étroitement associée aux valeurs et comporte donc des aspects subjectifs. Diverses procédures ont été mises au point, qui possèdent chacune leurs propres avantages et inconvénients. La procédure d'évaluation qui accompagne la pondération peut être décrite comme « une rencontre entre les informations disponibles relatives à un ensemble de faits donnés et un système de valeurs personnel, qui aboutit à un jugement sur les faits eux-mêmes » (Giegrich *et al.*, 1995). Il serait donc erroné de parler d'une « pondération objective ». Ce qui ne signifie pas, toutefois, que la pondération soit nécessairement arbitraire. Il est capital que toutes les questions en jeu soient présentées assez clairement et précisément pour que des personnes extérieures puissent les comprendre à coup sûr.

La pondération des différents facteurs et de leur impact sur l'environnement est la plus grande difficulté que pose une ACV. Si certains préconisent d'établir l'intensité des impacts en prenant des facteurs quantitatifs distincts, de les additionner et de tirer des conclusions ou de prendre des décisions en fonction du total, d'autres soutiennent qu'une ACV ne peut que récapituler les facteurs en jeu, mais que l'interprétation proprement dite ou la pondération des diverses émissions (par exemple le CO₂ par rapport au mercure dans le sol) et les conclusions issues de cette interprétation incombent aux responsables des décisions politiques ou économiques.

La figure 4.2 illustre les différentes méthodes d'évaluation applicables en utilisant les émissions de la planète et les interférences environnementales à des fins de comparaison. La somme estimée de toutes les émissions annuelles de la planète est considérée comme l'écobilan total. La comparaison fait apparaître toute une série de priorités; c'est dû en partie aux différentes méthodes et en partie à l'emploi de différents ensembles de données pour la pondération. Les différentes méthodes ne visent pas toutes les mêmes objectifs, ce qui débouche automatiquement sur des différences d'appréciation de l'impact. On constate toutefois que la plupart des méthodes d'évaluation de l'impact peuvent décrire plus de 90 pour cent des impacts planétaires à partir d'un nombre relativement petit d'émissions ou de ressources. On accorde généralement une grande priorité au réchauffement de la planète et à l'appauvrissement de la couche d'ozone et une faible priorité à l'utilisation des sols. Le groupe d'experts de la Landbank attache une énorme importance au réchauffement de la planète (plus de 80 pour cent) et la méthode des Stratégies de priorité en matière d'environnement (*Environmental Priority Strategies* – EPS) à l'utilisation des ressources (environ 70 pour cent). Une fixation de priorités aussi claire mérite un examen attentif. On admet généralement qu'il convient d'être attentif aux catégories d'impact suivantes : la raréfaction des ressources, le réchauffement planétaire et l'appauvrissement de la couche d'ozone. D'autres catégories sont actuellement débattues.

◆ Figure 4.2. **Résultats d'une ACV planétaire conduite selon différentes méthodes d'évaluation de l'impact**



CML + NSAEL : Méthodes de caractérisation selon le Centre for Milleukunden Leiden (CML), en conjonction avec une approche « distance nécessaire pour atteindre l'objectif », fondée sur le NSAEL (le niveau où il y a aucun effet négatif significatif).
 CML + PANEL : Caractérisation CML, en conjonction avec un panel néerlandais.
 CML + MET : Caractérisation CML, en conjonction avec une approche fondée sur la pénurie écologique et fondée sur le plan national pour l'environnement des Pays-Bas.
 UBP (CH) : Approche fondée sur la pénurie écologique, en conjonction avec des aspects de pollution définis par la Suisse.
 EPS : Stratégies prioritaires pour l'environnement (EPS), calculées en utilisant les valeurs standard dérivées d'une enquête d'opinion publique.
 QGR : Relation à l'objectif de qualité (QGR), en tenant compte des médias environnementaux.
 Landbank Panel : Évaluation de panel, fondée sur une enquête à plusieurs étapes parmi des experts en matière d'environnement.
 Source : Förster, 1994.

Il est incontestable qu'une ACV ne vise pas à déterminer les impacts *réellement* causés par un produit dans ces catégories, car dans de nombreux secteurs, la justification scientifique et les données correspondantes font tout simplement défaut. L'évaluation se réfère aux impacts *potentiels* sur l'environnement à partir des éléments clés de l'inventaire.

Les 15 catégories d'impact énumérées ci-dessous font l'objet d'accords internationaux pour la protection de l'environnement, tels que la Déclaration de Rio, le Programme Action 21 ou le Protocole de Montréal (Heijungs, 1992) :

- épuisement des ressources abiotiques;
- déclin des ressources biotiques;
- réchauffement de la planète;
- appauvrissement de la couche d'ozone;
- toxicité pour l'homme;
- écotoxicité pour les organismes aquatiques;
- écotoxicité pour les organismes terrestres;

- formation d'oxydants photochimiques (« smog d'été »);
- acidification;
- enrichissement en éléments nutritifs;
- réchauffement de l'eau par les eaux résiduaires;
- pollution olfactive;
- nuisances sonores;
- atteintes aux écosystèmes et aux paysages;
- victimes (humaines).

Il existe des ACV quelque peu simplifiées qui ne tiennent compte que de l'énergie et de la masse, mais qui peuvent néanmoins livrer des informations importantes et signaler des cas de pollution aiguë. La consommation d'énergie ne constitue pas, à proprement parler, un impact sur l'environnement, bien qu'elle soit considérée comme un problème crucial. La pollution liée à la fourniture et à la distribution d'énergie a une influence considérable sur l'environnement vivant et non vivant.

PRATIQUE DE L'ACV

L'analyse du cycle de vie remonte à plus de vingt ans (Rubik et Teichert, 1997). Elle a débuté en 1974 avec une étude menée par Batelle, un bureau de consultants allemand (Oberbacher *et al.*, 1974). Plus de 600 évaluations conduites en Allemagne, en Italie, en Suède et en Suisse ont été passées en revue (voir l'annexe 4.3).

Très peu d'ACV ont été réalisées avant le début des années 80, mais elles sont devenues plus fréquentes à partir du milieu des années 80 et ont pris leur essor dans les années 90. En Allemagne, on dénombre au moins 16 études par an depuis 1990; en Suisse, le nombre d'ACV a été de 15 à 20 par an durant cette décennie; et en Suède, il a commencé à augmenter vers 1992 et accuse depuis lors à peu près la même fréquence qu'en Allemagne.

En Allemagne, ce sont les entreprises qui commandent la plupart des ACV, suivies par les pouvoirs publics (à un niveau bien moindre) et les associations professionnelles. En Suisse, l'université vient juste après l'industrie, tandis qu'en Suède et en Italie le secteur privé arrive en premier. Il ne faudrait cependant pas sous-estimer le rôle du secteur public, car les ACV commandées par ce secteur ont des répercussions sur le secteur privé. Certains instruments de la politique nationale d'environnement, axés sur les produits (Oosterhuis *et al.*, 1996; Rubik et Teichert, 1997), se réfèrent explicitement ou implicitement au raisonnement sous-tendant l'ACV ou le cycle de vie, comme dans le programme allemand d'écolabellisation « ange bleu » et la nouvelle loi allemande sur la gestion des déchets (*Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz*). Le programme européen d'écolabellisation s'appuie explicitement sur des résultats d'ACV.

En dehors de la politique des pouvoirs publics, les forces du marché sont susceptibles d'inciter fortement les entreprises à pratiquer des ACV. Depuis que les détaillants et les consommateurs demandent des informations sur les caractéristiques écologiques des produits, certaines sociétés ont exploité les résultats de leur ACV dans leur stratégie de commercialisation, ce qui oblige parfois leurs concurrents à réagir en présentant leurs propres informations tirées d'ACV. En Allemagne, la prise de conscience accrue des problèmes d'environnement par les consommateurs a dépassé toutes les autres pressions. Les détaillants et les consommateurs incarnent une force si puissante sur le marché que leur comportement à l'achat peut influencer les attitudes des producteurs et les pousser à s'orienter davantage vers le respect de l'environnement (voir aussi le cinquième chapitre). La politique des pouvoirs publics et le marché ont également incité des entreprises ou un secteur à réaliser des ACV collectives. Les industries automobile et chimique offrent des exemples à cet égard.

La protection de l'environnement semble préoccuper avant tout les responsables de la gestion, puisqu'au sein des entreprises, l'élan en faveur des ACV est venu principalement de la direction. La possibilité de réduire les coûts, notamment par une diminution de l'utilisation des ressources, entre aussi en ligne de compte et nombreuses sont les entreprises qui ont constaté que la protection de l'environnement et la rentabilité ne s'excluaient pas mutuellement de façon systématique.

En Allemagne, les industries automobile et chimique sont celles qui commandent le plus d'ACV. L'industrie de la transformation des aliments et le secteur de l'épicerie fine jouent aussi un rôle non négligeable. Une analyse des entreprises en fonction de leur taille révèle que les grandes entreprises consultent ou commandent la majorité des ACV. En Suisse, l'industrie de la transformation du caoutchouc et des plastiques est le premier commanditaire d'ACV; elle est suivie par l'industrie du traitement et de la transformation des minéraux non métalliques et par l'industrie de la fabrication et de la transformation du verre. En Suède, l'élan vient du génie électrique, tandis qu'en Italie, l'industrie chimique et le génie électrique forment la plus grande part. Une comparaison entre groupes de produits fait apparaître une répartition plus large dans l'industrie, néanmoins, trois industries prédominent : l'automobile, la construction et l'emballage.

Le nombre d'experts et le niveau de compétence internes sont souvent élevés. A titre d'exemple, la multinationale Procter and Gamble emploie 15 personnes à travers le monde, qui se consacrent exclusivement aux ACV. Dow Chemical et Volvo emploient chacune six personnes dans ce domaine (Atlantic Consulting *et al.*, 1996).

Biotechnologies et produits biotechnologiques

D'après les études disponibles, la biotechnologie est sous-représentée dans les ACV. On trouve des exemples dans le domaine des produits nettoyants et des détergents, où l'ACV a été appliquée à des substances particulières (enzymes et tensides), des technologies relatives aux déchets et dans le secteur des matières premières renouvelables.

Si des méthodes permettant de mesurer la propreté de produits et procédés industriels existent, leur mise en œuvre en est encore au stade expérimental. L'industrie a publié de nombreux documents sur le traitement des déchets solides, des eaux usées et des émissions, mais ils sont rarement liés aux produits manufacturés et exceptionnellement aux ressources utilisées.

Les données publiées fiables sont encore plus rares pour les procédés ou produits biotechnologiques que pour les procédés chimiques. Et la comparaison entre des procédés chimiques et biotechnologiques, sous la forme d'une ACV fiable, relève de l'exception.

EXEMPLES DÉTAILLÉS

Jusqu'à présent, des ACV bien définies et largement acceptées n'ont été effectuées que pour des cas particuliers. Rappelons qu'à l'instar de toutes les informations contenues dans le présent chapitre, seules les études accessibles au public sont examinées. On suppose généralement qu'il existe de nombreuses ACV internes non divulguées.

Premier exemple : comparaison entre des procédés de nettoyage enzymatiques et chimiques

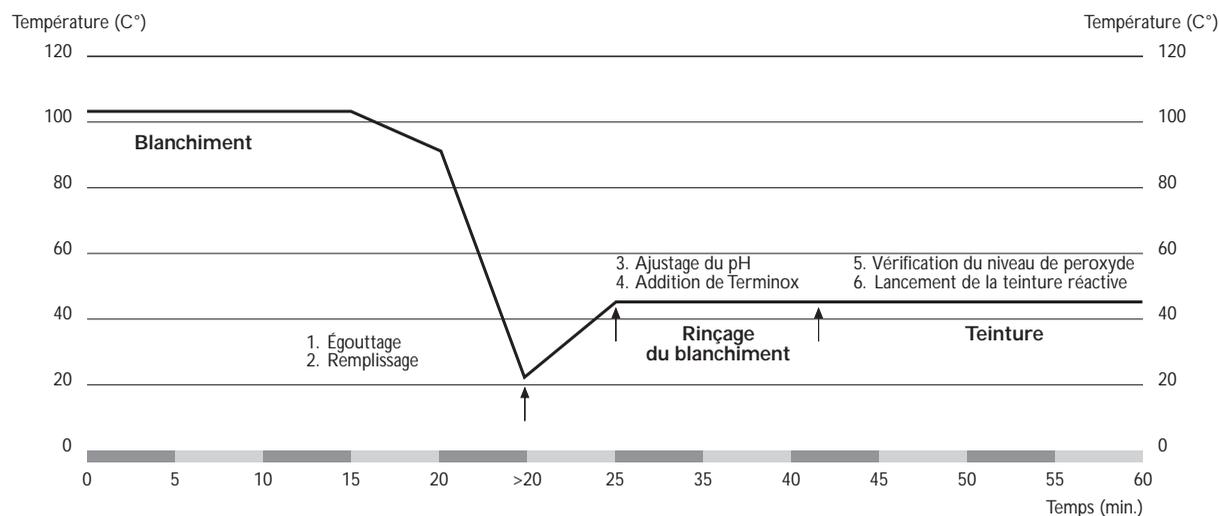
Novo Nordisk A/S au Danemark a publié des informations au sujet du procédé qu'il emploie pour enlever les résidus de peroxyde d'hydrogène après le blanchiment qui précède la teinture. Cette étape de la fabrication des textiles est appelée rinçage du blanchiment. Elle fait appel à une catalase (Terminox Ultra®) qui présente les avantages suivants : elle n'altère pas les teintures, il n'est pas nécessaire de chauffer ou de rincer le textile avant de le teindre, il n'y a pas de risque de surdosage dangereux, ni de formation de sous-produits dans les eaux résiduaires. La catalase est biodégradable et n'est pas toxique pour les organismes aquatiques.

Novo Nordisk a publié les résultats d'une comparaison entre trois méthodes différentes de rinçage du blanchiment :

- rinçage à froid : blanchiment → rinçage overflow (machine avec bac à trop-plein) → rinçage → rinçage → teinture;
- utilisation d'agents réducteurs : blanchiment → rinçage overflow → agent réducteur → rinçage → teinture;
- catalase (Terminox Ultra®) : blanchiment → rinçage overflow → Terminox Ultra® → teinture.

Le procédé d'utilisation de la catalase est exposé à la figure 4.3. Le traitement enzymatique dure environ 20 minutes, la température du rinçage du blanchiment et de la teinture est la même.

◆ Figure 4.3. *Rinçage du blanchiment avec l'enzyme Terminox Ultra®*



Source : Novo Nordisk, 1997.

Une ACV portant sur la totalité du procédé doit tenir compte de la production de l'enzyme. Novo a calculé l'inventaire du cycle de vie pour 10 litres de liquide contenant la catalase (voir au tableau 4.2). Une comparaison de la quantité d'eau consommée dans le procédé de rinçage du blanchiment, montre qu'en utilisant l'enzyme, la teinturerie économise 6 300-19 000 litres d'eau par tonne de textile. La

Tableau 4.2. **Inventaire du cycle de vie pour 10 litres de Terminox Ultra®**

| Utilisation des ressources | | Rejets dans les eaux usées | |
|---------------------------------------|------------------|---------------------------------------|-----------|
| Eau | 7 m ³ | Solides en suspension | 0.3 kg |
| Sol | 0.03 ha × an | DBO | 0.2 kg |
| Charbon, pétrole, gaz/non combustible | 260 kg | DCO | 0.5 kg |
| Minéraux | 320 kg | N total | 0.21 kg |
| | | P total | 0.38 kg |
| Utilisation de l'énergie | | Ions sulfate | 28 kg |
| Consommation totale d'énergie | 14 GJ | Ions chlorure | 1.7 kg |
| | | Ions fluorure | 0.8 kg |
| | | Ions métalliques | 0.061 kg |
| Émissions atmosphériques | | Acides mesurés par les H ⁺ | 0.028 kg |
| Dioxyde de carbone | 1 400kg | Hydrocarbures | 0.018 kg |
| Oxydes de soufre | 7.5 kg | Pétrole | 0.016 kg |
| Oxydes d'azote | 5.5 kg | Phénols | 0.0002 kg |
| Particules | 1.1 kg | Pesticides | 0.001 kg |
| Hydrocarbures | 6.6 kg | | |
| Autres composés organiques | 0.012 kg | Déchets solides | |
| Métaux | 0.0003 kg | Déchets industriels | 50 kg |
| Sulfure d'hydrogène | 0.0014 kg | Déchets minéraux | 7 kg |
| Chlorure d'hydrogène | 0.006 kg | Scories et cendres | 20 kg |
| Fluorure d'hydrogène | 0.0003 kg | Produits chimiques non toxiques | 20 kg |
| | | Produits chimiques toxiques | 0.0025 kg |

substitution de l'agent réducteur employé dans un rinçage à chaud par l'enzyme peut procurer une économie supplémentaire de 1.6-1.8 GJ/tonne de textile et la réduction de la consommation d'énergie abaisse le rejet de CO₂ de 100-120 kg/tonne de textile produite.

Deuxième exemple : lavage des jeans à la pierre (stonewashing)

Les jeans font partie des vêtements les plus populaires du monde (Kothuis et Schelleman; Umweltbundesamt, 1995). Durant la fabrication, le textile est teint à l'indigo. L'aspect «lavé à la pierre» est l'une des nombreuses apparences conférées aux jeans. Il résulte de l'enlèvement local de la coloration indigo par un traitement à la pierre ponce, dans le tambour de lavage, destiné à user le vêtement par frottement. Des enzymes peuvent être utilisées pour faciliter l'enlèvement par frottement de la teinture indigo à la surface du fil. Dans la pratique, on recourt à trois méthodes de lavage :

- lavage réalisé exclusivement à la pierre ponce;
- lavage sans pierres, avec la seule présence d'enzymes («biodé lavage»);
- lavage combinant la pierre ponce et les enzymes.

Aujourd'hui, le «biodé lavage» est le principal procédé employé pour conférer un aspect «lavé à la pierre» dans l'industrie du finissage des jeans. Cette évolution s'est produite au cours de la décennie précédente, sous l'influence des facteurs suivants :

- le coût du procédé : le «biodé lavage» est le plus économique;
- l'aspect : l'apparence des jeans lavés à la pierre ponce diffère de celle des jeans soumis au «biodé lavage» et chacune répond à la demande d'un segment déterminé du marché;
- l'impact sur l'environnement : si le «biodé lavage» offre des avantages du point de vue de l'environnement, ceux-ci ne pèsent guère dans la prise de décision des entreprises.

Comparaison de différents procédés biotechnologiques et chimiques d'après leur ACV

Une ACV a été pratiquée sur ces trois méthodes destinées à réduire la quantité d'indigo sur la surface extérieure des jeans, à l'aide d'une cellulase neutre et d'une pierre ponce de Turquie. Sur les différentes étapes du procédé appliqué dans un centre de finissage des jeans, trois étapes se rapportent spécifiquement à la production de jeans lavés à la pierre : le lavage à la pierre, l'élimination des pierres par rinçage et le lavage (nettoyage du vêtement). Seules ces trois étapes ont été couvertes par l'ACV.

Le produit étudié était le modèle 501 de Levi Strauss and Co. dont le finissage s'effectue à Anvers en Belgique. Les jeans sont lavés à la pierre à la fin de la chaîne de confection. Les limites de l'ACV comportaient l'extraction de la pierre ponce, la production des cellulases, le transport et, enfin, le finissage des jeans. Les principales entrées et sorties sélectionnées pour l'ACV étaient l'énergie, les matières premières, les adjuvants et les rejets ayant une incidence sur l'environnement. L'inventaire des données a été classé; autrement dit, les quantités de substances ont été converties en cotes en fonction de leur contribution à plusieurs paramètres de l'environnement. Les cotes environnementales peuvent ensuite être additionnées pour fournir une estimation de la contribution totale du produit à des paramètres déterminés de l'environnement.

Résultats de l'ACV

L'ACV a révélé que la méthode du «biodé lavage» donne les meilleurs résultats à presque tous les égards. La méthode du lavage «combiné» est la plus avantageuse en ce qui concerne la toxicité pour l'homme «en ce qui concerne l'eau», le rejet de composés phosphorés dans l'eau étant relativement plus élevé par la méthode du «biodé lavage». Le procédé à la pierre ponce donne les meilleurs résultats du point de vue de l'odeur, principalement à cause des émissions d'ammoniac procédant de l'agriculture et de la production d'ammoniac pour les engrais utilisés dans la fabrication de la matière première de la fermentation de la cellulase. Le tableau 4.3 résume les résultats de l'ACV.

Tableau 4.3. **Résultats de l'ACV des procédés de « lavage à la pierre »**

| Effet sur l'environnement | Pierre ponce | Pierre ponce + cellulase | Cellulase |
|--|----------------------|--------------------------|----------------------|
| Valeur énergétique des combustibles (GJ) | 1.0 | 0.7 | 0.6 |
| Demande chimique en oxygène | 5.2 | 3.8 | 3.1 |
| Toxicité pour l'homme : air | 0.7 | 0.3 | 0.1 |
| Acidification | 0.6 | 0.2 | 0.1 |
| Enrichissement en éléments nutritifs | 0.2 | 0.2 | 0.1 |
| Effet photochimique | 0.1 | 0.1 | 0.1 |
| Odeur | 1.9×10^{-4} | 4.9×10^{-4} | 7.9×10^{-4} |
| Toxicité pour l'homme : eau | 2.0×10^{-3} | 4.6×10^{-5} | 7.4×10^{-4} |
| Écotoxicité pour les organismes aquatiques | 4.6×10^{-2} | 1.6×10^{-2} | 1.2×10^{-3} |
| Réchauffement de la planète | 62.6 | 44.5 | 35.7 |

Résultats du classement des valeurs de l'ACV concernant trois méthodes de lavage à la pierre

S'agissant de l'air, de l'eau et des déchets, on a mené une comparaison du coût économique, en s'appuyant sur les réglementations ou les besoins en matière d'environnement, pour les trois méthodes de lavage à la pierre. Les opérations les plus chères sont l'élimination de la pierre ponce de l'eau résiduaire, des ions chlorure et de la demande chimique en oxygène de l'eau, et du CO₂ et des hydrocarbures de l'air. Ces coûts augmenteront s'il faut respecter les normes futures potentielles requises par le développement durable.

Les coûts économiques les plus élevés au titre des réglementations ou des besoins en matière d'environnement sont associés au traitement des eaux usées (tableau 4.4). Le coût des rejets dans l'eau représente quelque 75 pour cent de la totalité des dépenses liées à l'environnement pour les trois méthodes de lavage à la pierre.

Tableau 4.4. **Comparaison des coûts économiques totaux**

\$/100 kg de jeans

| Coût économique de la protection de l'environnement | Lavage à la pierre ponce | Pierre ponce + cellulase | Cellulase |
|---|--------------------------|--------------------------|-----------|
| Air | 8.31 | 5.57 | 4.13 |
| Eau | 28.10 | 20.16 | 16.37 |
| Déchets | 2.01 | 1.26 | 0.62 |
| Total | 38.42 | 26.99 | 21.12 |

Conclusions

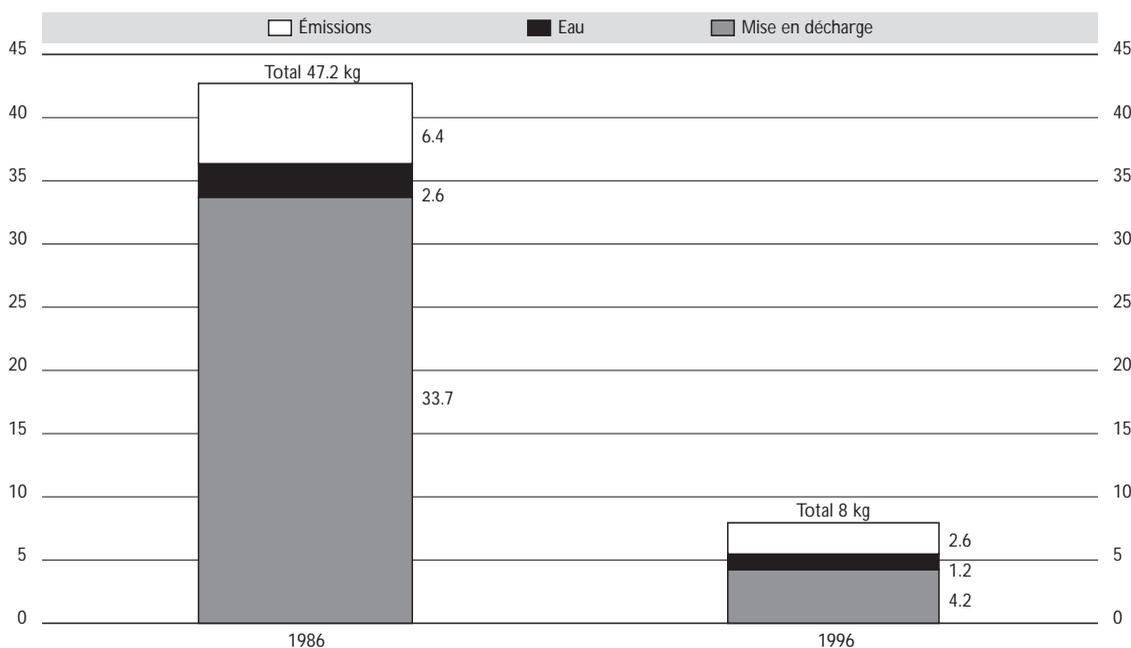
L'ACV nous autorise à considérer le procédé de biodéveloppement comme plus respectueux de l'environnement que le lavage à la pierre ponce. Ce facteur ne constitue cependant pas le vecteur du succès industriel de ce procédé; en fait le procédé traditionnel a été remplacé pour des motifs fondés sur l'économie et la qualité.

Troisième exemple : réduction des déchets associés à la production

Pour donner une idée de l'évolution de la protection de l'environnement dans la production, BASF a publié des chiffres comparatifs couvrant plusieurs années dans son *Environmental Report 1996*

(figure 4.4). La pollution par tonne de produits qui s'élevait à 42.7 kg en 1986 a été ramenée à 8.0 kg en 1996. En 1996, la fabrication de 8.1 millions de tonnes de produits s'est accompagnée en moyenne de 0.8 pour cent de matières évacuées dans les eaux usées ou les flux de déchets gazeux, ou éliminées. Cette baisse sensible de la pollution associée à la production est essentiellement imputable à la mise en œuvre de technologies de dépollution, telles que des installations de purification des eaux et des gaz usés, l'incinération des résidus et la mise en décharge contrôlée. L'application constante de la devise « éviter, réduire, réutiliser » à partir de la planification des procédés et des installations a donné lieu à une réduction supplémentaire de la génération ou du développement des déchets et des rejets.

◆ Figure 4.4. Réduction des déchets issus de la production



Quatrième exemple : indice d'éco-productivité

Novo Nordisk au Danemark a réduit au minimum l'impact de ses opérations sur l'environnement en mettant au point des procédés plus respectueux de l'environnement et en réduisant les émissions, la consommation de matières premières et l'énergie. Toutes ces données ont été publiées par Novo Nordisk en 1995.

Un indice d'éco-productivité (IEP), reflétant l'utilisation des ressources, a été calculé afin d'illustrer l'effet. L'IEP montre l'efficacité de l'utilisation des ressources durant la production au cours d'une année. Il rapporte l'échelle de production à la consommation des matières premières, de l'eau ou de l'énergie. L'IEP est calculé comme suit :

$$\text{IEP} = \text{chiffre d'affaires indexé à prix constants} \times 100 / \text{consommation des ressources indexée.}$$

Où 1990 = 100.

L'indice du chiffre d'affaires (volume/gamme de produits) est ajusté pour tenir compte de la fluctuation des taux de change et des prix. Le tableau 4.5 donne l'exemple d'un IEP se rapportant aux matières premières entre 1990 et 1995.

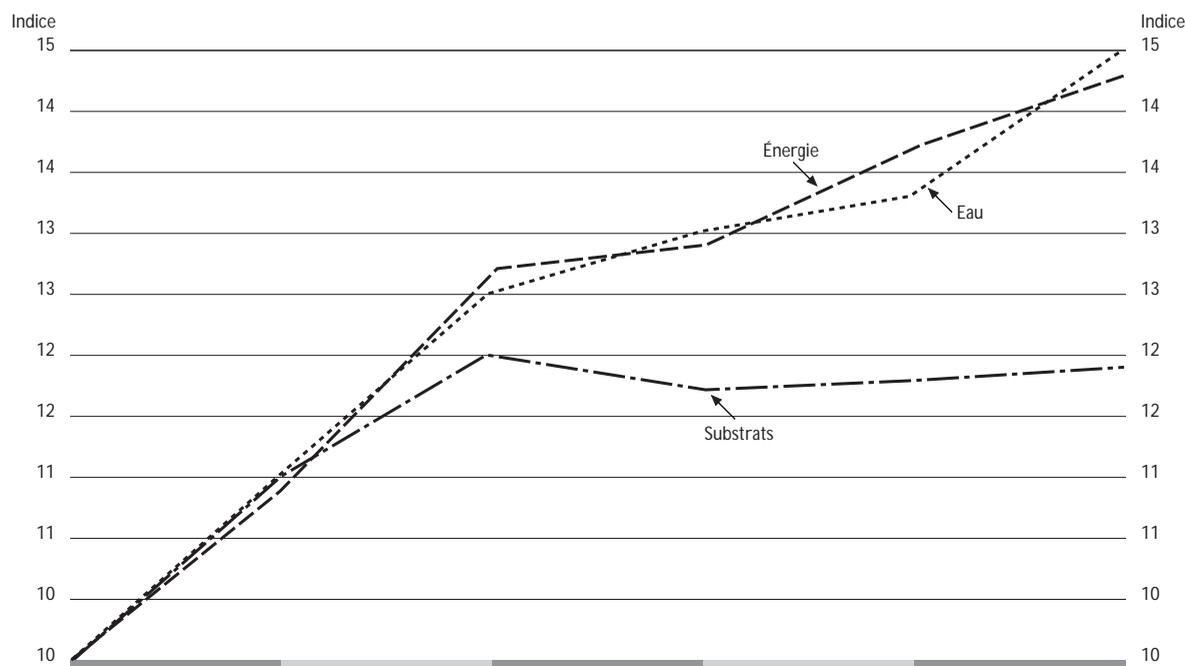
Tableau 4.5. Exemple d'un IEP se rapportant aux matières premières

| | 1990 | 1991 | 1992 | 1993 | 1994 | 1995 |
|--|------|------|------|------|------|------|
| Production d'enzymes : | | | | | | |
| chiffre d'affaires ajusté = volume/gamme de produits | – | 22 % | 21 % | 22 % | 14 % | 8 % |
| Indice du chiffre d'affaires ajusté | 100 | 122 | 148 | 165 | 188 | 203 |
| Quantité de matières premières dans 1 000 tonnes | 159 | 169 | 187 | 214 | 244 | 261 |
| Indice des matières premières | 100 | 106 | 118 | 135 | 153 | 164 |
| Indice d'écoproductivité B × 100/D | 100 | 115 | 125 | 122 | 123 | 124 |

L'augmentation de l'IEP traduit l'amélioration de l'utilisation d'une ressource déterminée. La figure 4.5 illustre la tendance de trois IEP entre 1990 et 1995. La consommation d'eau est passée de 3.75 à 4.78 millions de mètres cubes et la consommation d'énergie de 3.02 à 3.88 GJ. Novo Nordisk s'est fixé les objectifs suivants entre 1995 et 1997 en ce qui concerne la consommation des matières premières (substrats), de l'eau et de l'énergie pour la production et les produits :

- augmentation annuelle moyenne de 2 points quant à l'écoproductivité des matières premières;
- augmentation annuelle moyenne de 5 points quant à l'écoproductivité de l'eau;
- augmentation annuelle moyenne de 4 points quant à l'écoproductivité de l'énergie.

◆ Figure 4.5. *Indice d'écoproductivité*



Cinquième exemple : technologie de l'ADN recombiné appliquée à la réduction de la pollution de l'environnement

COGNIS GmbH (Henkel) en Allemagne a fait paraître une ACV de protéases pour détergents qui compare la fermentation effectuée par des micro-organismes recombinés et non modifiés (Bahn et Intemann, 1997). (Pour plus de détails, se reporter à l'étude de cas 4.1, page 116.)

Les protéases de détergents, qui enlèvent les salissures protéiniques, constituent un ingrédient essentiel des détergents modernes. En raison de leur effet catalytique, les protéases sont utilisées en faibles concentrations (0.1-1.0 pour cent). Il n'est pas possible d'obtenir un même pouvoir lavant en les remplaçant par d'autres substances ou en élevant la température de lavage.

L'ACV a permis de comparer des procédés de production de protéases reposant sur un organisme optimisé selon une procédure de sélection classique et sur un organisme recombiné. L'objectif immédiat de l'ACV consistait à déterminer la pollution liée à la production de l'enzyme et à révéler d'éventuelles faiblesses dans cette production. Elle visait ensuite à évaluer les potentialités écologiques des méthodes de génie génétique.

L'évaluation n'englobe pas la totalité du cycle de vie des protéases de détergents, mais uniquement la production de l'enzyme, c'est-à-dire tous les procédés depuis la production des matières premières jusqu'à l'obtention du produit fini sous forme de granulés. On a également tenu compte du transport des matières premières utilisées durant la production de l'enzyme, entre les différents fabricants et les producteurs d'enzymes. Les bâtiments, les appareils, etc., n'ont pas été pris en considération, la production d'enzymes étant un procédé à forte intensité énergétique et massique, dans lequel l'infrastructure ne joue qu'un rôle très secondaire.

La production des protéases ne donne lieu qu'à un seul sous-produit utile, un engrais organique obtenu à partir de la biomasse résultant de la production des protéases. Les boues résiduelles subissent d'abord un essorage mécanique puis un séchage thermique, qui fournissent un engrais à haute valeur nutritive.

Inventaire

La production de 1 kg d'enzyme à partir de l'organisme classique demande 3.54 kg de matières premières, mais l'obtention d'une quantité d'enzymes dotée du même pouvoir lavant à partir de l'organisme recombiné ne requiert que 2.34 kg, soit une réduction de 34 pour cent de la consommation de matières premières.

Le passage du procédé classique à une production assistée par le génie génétique réduit de 60 pour cent la demande en énergie de procédé, qui passe de 131 MJ/PL à 52 MJ/PL (mégajoules/pouvoir lavant). La production de la quantité d'enzymes répondant aux besoins annuels du groupe Henkel s'accompagne d'une économie d'énergie primaire d'environ 420 000 GJ. Ce chiffre correspond à l'énergie primaire consommée chaque année par environ 170 000 foyers ou 380 000 personnes pour laver leur linge.

A côté des entrées, les émissions doivent aussi être calculées. Le tableau 4.6 récapitule les émissions globales associées aux diverses protéases de détergents tout au long de leur chaîne de production.

Compte tenu de la demande annuelle de l'entreprise, le recours à la nouvelle enzyme produite à partir d'organismes recombinés a permis d'abaisser les émissions annuelles d'environ 30 000 tonnes pour le CO₂, 170 tonnes pour le carbone et 190 tonnes pour le dioxyde de soufre.

Évaluation de l'impact

Si les résultats d'une ACV sont destinés à être collationnés, les différentes sources de pollution devront être comparées et leur poids respectif estimé. Comme nous l'avons indiqué plus haut, la pondération dépend beaucoup des priorités. Dans les années 70, par exemple, la consommation d'énergie pesait de façon décisive dans l'évaluation des impacts sur l'environnement. Dans les

Tableau 4.6. Émissions dégagées tout au long des chaînes de production des protéases pour détergents

| | Unité | Organisme classique | Organisme recombiné |
|---|-------|---------------------|---------------------|
| Pollution atmosphérique | | | |
| Dioxyde de carbone total | g/PL* | 8 507 | 3 422 |
| – Issu des matières premières renouvelables | g/PL* | 1 548 | 849 |
| – Issu des matières premières fossiles | g/PL* | 6 959 | 2 572 |
| Hydrocarbures | g/PL* | 67 | 36 |
| Oxydes de soufre | g/PL* | 60 | 25 |
| Oxydes d'azote | g/PL* | 49 | 15 |
| Poussières | g/PL* | 24 | 7 |
| Monoxyde de carbone | g/PL* | 14 | 2 |
| Pollution des eaux résiduaires | | | |
| Demande chimique en oxygène | g/PL* | 158 | 77 |
| Demande biologique en oxygène | g/PL* | 7 | 4 |
| Déchets | | | |
| Déchets organiques | g/PL* | 1 033 | 313 |
| Scories/cendres | g/PL* | 98 | 26 |

PL* = quantité d'enzyme dont le pouvoir lavant équivaut à celui de 1 kg d'enzyme produite selon le procédé classique.

années 80, les polluants à l'origine du déclin des forêts ont supplanté la demande énergétique pour devenir le critère principal. Dans les années 90, ce sont les émissions de CO₂ et le réchauffement de la planète qui s'ensuit qui représentent la question essentielle.

Dans le cadre de cette ACV, les émissions atmosphériques ont été évaluées en fonction de leur incidence sur le réchauffement de la planète, la formation de pluies acides et de smog. Les rejets dans l'eau ont été estimés d'après la charge nutritive des eaux et la consommation d'oxygène connexe. L'évaluation des impacts confirme nettement l'affirmation générale selon laquelle l'utilisation d'une souche modifiée par voie génétique est susceptible de réduire d'un facteur 3 à 4 la consommation d'énergie et de ressources ainsi que la pollution due aux rejets.

Sixième exemple : production de bio-éthanol

L'éthanol peut être produit par voie biotechnologique ou synthétique. En 1991, la production mondiale annuelle d'éthanol se chiffrait à 15.1 millions de tonnes, dont 12.6 millions procédaient de ressources agricoles et 2.5 millions de produits d'alimentation fossiles. Du point de vue du volume (à l'exclusion de la production de boissons), l'éthanol représente le produit le plus important de la biotechnologie. Du point de vue financier, il n'est dépassé que par la production d'antibiotiques.

L'étude de cas 4.2 (page 120) compare la production du bio-éthanol et de l'éthanol de synthèse. Cette étude visait à établir la faisabilité théorique d'une ACV portant sur des produits d'origine biotechnologique et à fournir une description du système et des conditions régissant ses limites, ainsi qu'une interprétation des résultats.

Le bio-éthanol est fabriqué à partir du sucre qui peut provenir de cultures telles que la canne à sucre, la betterave ou le maïs. Lorsqu'il est produit à partir de la canne à sucre, celle-ci est broyée et le sucre en est extrait avec de l'eau d'imbibition. Le résidu, la bagasse, peut servir à générer de la vapeur pour les opérations ultérieures. Des levures fermentent le sucre et l'éthanol est recueilli par distillation. L'utilisation de la bagasse comme combustible implique que les étapes de la production d'éthanol qui vont du broyage de la canne à l'obtention d'une solution d'éthanol à 94.5 pour cent par distillation sont autosuffisantes sur le plan énergétique. Les résidus de distillation peuvent être éliminés ou utilisés comme engrais ou comme aliment pour animaux. Globalement, la production de 1 kg d'éthanol consomme 16.8 kg de canne et engendre 14.8 kg de résidus de distillation.

Cette étude n'a pas couvert la pollution de l'eau et du sol, les informations disponibles à ce sujet étant inadéquates.

En comparant les données concernant l'éthanol produit à partir de céréales ou de la canne à sucre avec les chiffres rapportés par d'autres études, par exemple celle de Parisi (1983), on a réalisé un dépouillement exhaustif des études de la production d'éthanol à partir de la canne à sucre, de la betterave sucrière, de céréales et d'autres matières premières. Elles se recoupent avec un certain degré de dispersion. Les résultats concernant la production d'éthanol à partir de la betterave sucrière, qui est aussi abondamment documentée, sont du même ordre de grandeur.

L'éthanol synthétique est fabriqué à partir de l'éthylène, par hydratation catalytique en présence d'acide sulfurique et hydrolyse de l'ester résultant. Les données relatives à la production d'éthanol synthétique ont été obtenues auprès de l'industrie et correspondent à l'année 1995.

Résultats de l'ACV

La production d'éthanol à partir de matières premières renouvelables requiert de très grandes quantités d'énergie, dont la majeure partie est cependant renouvelable. Dans le cas de la canne à sucre, on a considéré que le procédé était autosuffisant sur le plan énergétique et que la production ne nécessitait qu'un faible apport d'énergie fossile. La demande associée à l'engrais, au transport et aux machines s'élève environ à 6 MJ/kg d'éthanol. La demande énergétique liée aux céréales est inférieure, la pollution de l'environnement étant imputable aux produits connexes (par exemple, les aliments pour animaux), mais le procédé de fabrication est tributaire d'un apport énergétique extérieur. Si bien que la quantité d'énergie fossile requise s'élève à quelque 19 MJ/kg d'éthanol. La synthèse de l'éthanol utilise le pétrole brut et le gaz naturel comme sources de carbone. Les étapes du procédé de synthèse, à savoir le raffinage, le vapocraquage pour la production d'éthylène et la synthèse proprement dite, consomment 62 MJ d'énergie fossile par kg d'éthanol.

La consommation d'énergie renouvelable est jugée plus favorable à l'environnement que la consommation d'énergie fossile non renouvelable. Aussi, du point de vue de la consommation d'énergie primaire, en dépit d'une quantité globale plus élevée, la production de bio-éthanol est supérieure à la production d'éthanol synthétique.

S'agissant des émissions de CO₂, la production biotechnologique est assortie d'avantages majeurs : le bio-éthanol constitue un puits de CO₂, et ce phénomène est encore plus marqué avec la canne à sucre qu'avec les céréales (tableau 4.7).

Tableau 4.7. Émissions de CO₂ résultant de la production biotechnologique et synthétique de l'éthanol

| Étape de production | Bio-éthanol | Bio-éthanol | Éthanol de synthèse |
|--|--|-------------|--------------------------|
| Produit de départ | Canne à sucre | Céréales | Pétrole brut/gaz naturel |
| Fourniture d'énergie pour la production d'éthanol | Combustion de la bagasse assurant l'autosuffisance | Publique | Interne/publique |
| Production globale | 3.17 kg/kg | 1.50 kg/kg | 1.88 kg/kg |
| Combustion de la bagasse | -2.82 kg/kg | | |
| CO ₂ composant les molécules d'éthanol (94.5 %) | -1.81 kg/kg | -1.81 kg/kg | |
| Totalité des émissions de CO ₂ | -1.46 kg/kg | -0.31 kg/kg | 1.88 kg/kg |

Source : IKP, Université de Stuttgart, 1996a.

En ce qui concerne les autres émissions dans l'air, les données sont moins fiables. Dans le cas de la canne à sucre, la combustion de la bagasse et la culture de la canne sont à l'origine des émissions atmosphériques. S'agissant des céréales, les sources d'émission sont la culture et l'énergie de procédé. Les émissions associées à l'éthanol de synthèse procèdent de la production et du traitement du pétrole brut ou du gaz naturel et de l'énergie requise pour ces procédés. Pour des composés tels que

le dioxyde de soufre, le bio-éthanol et l'éthanol de synthèse se situent dans la même gamme. S'agissant des émissions de particules, le brûlage de matières humides désavantage la canne à sucre par rapport aux céréales qui n'exigent pas cette opération. La production à partir de la canne à sucre et des céréales dégage plus d'oxyde d'azote que le procédé de synthèse.

CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS QUANT AUX MÉTHODES DE TRAVAIL A APPLIQUER ULTÉRIEUREMENT

Si les ACV sont théoriquement parfaitement réalisables et appropriées aux produits et procédés biotechnologiques, relativement peu sont disponibles à l'heure actuelle. Et ce, pour deux raisons principales. Tout d'abord, l'apparition relativement récente des procédés biotechnologiques par rapport aux procédés chimiques. Ensuite, l'évaluation des procédés biotechnologiques soulève plus de difficultés méthodologiques. Il existe des différences considérables dans la façon d'opérer par rapport aux ACV portant sur des synthèses classiques. Les produits de la biotechnologie procèdent souvent de matières premières renouvelables, ce qui soulève des questions au sujet de l'évaluation de l'exploitation des ressources renouvelables, de l'utilisation des sols et des crédits de CO₂ (c'est-à-dire le CO₂ produit au cours des procédés biotechnologiques par rapport à celui dégagé par d'autres transformations). Bien souvent, les données de référence concernant la production biotechnologique sont inadéquates. Les entreprises de biotechnologie refusent souvent de divulguer des informations essentielles qu'elles jugent confidentielles et stratégiques.

L'ACV s'appliquant à des produits et procédés biotechnologiques présente un avantage en ce qu'elle permet de se concentrer sur les charnières de la chaîne de production/consommation qui sont réellement pertinentes pour déterminer les différences du point de vue de l'environnement entre plusieurs variantes. Elle offre ainsi la possibilité d'optimiser les procédés étudiés.

Il est cependant exceptionnel à l'heure actuelle de disposer d'informations suffisantes sur les flux massiques et énergétiques. Certains paramètres de procédé, tels que le type et la quantité de rejets dans l'air, l'eau et le sol, sont difficilement accessibles. En outre, il est délicat de procéder à des généralisations ou d'appliquer les conclusions relatives à un procédé de production biotechnologique à un autre, parce que la majorité des procédés actuels sont « originaux ». Il existe cependant des études qui examinent les flux d'énergie et de matières nécessaires à la production agricole de ressources renouvelables. Elles portent souvent sur l'utilisation de différentes matières premières destinées à la fabrication du même produit (l'éthanol peut être élaboré à partir de la canne à sucre, de la betterave, du maïs, de la cellulose, etc.). Elles mettent en évidence d'importantes variations entre les pays ou entre les types de sols et soulignent la dépendance de la matière première en question à l'égard des rendements annuels des cultures. De surcroît, la production biotechnologique donne lieu à une dispersion des données supérieure. La fluctuation des rendements et des durées de séjour des produits de départ ainsi que les modalités de lancement doivent être étudiées sur des périodes plus longues.

Pour comparer les résultats, il est nécessaire de vérifier l'équivalence fonctionnelle. Ce test est plus significatif pour de nombreux produits biotechnologiques ou modifiés génétiquement que pour les produits fabriqués selon des méthodes classiques, non seulement pour des raisons techniques, mais aussi parce que le débat et la controverse publics peuvent ajouter une dimension éthique. C'est pourquoi les procédures ordinaires de collecte de données pour une ACV doivent être adaptées aux exigences particulières de la biotechnologie. Il faudra pour ce faire mettre au point d'autres méthodes appropriées.

Nécessité du développement de la recherche méthodologique à l'intersection entre l'ACV et la biotechnologie

On pourrait énumérer toute une série de thèmes de recherche susceptibles de conduire à l'amélioration et à une utilisation plus large des outils analytiques d'aide à la décision tels que l'ACV. Cette partie reprend certains thèmes susceptibles d'être traités en priorité (voir la liste complète à l'annexe 4.4).

Citons tout d'abord l'adoption d'une démarche globale en vue d'harmoniser l'ACV avec d'autres méthodes, notamment la comptabilité écologique et d'autres procédures permettant de fixer des objectifs et de définir les principes régissant la sélection du ou des outils les plus appropriés.

Une manière de simplifier cette démarche consisterait à mettre au point des techniques «rapides et faciles», fournissant des résultats moins détaillés, mais néanmoins fiables et à même de satisfaire les attentes des parties intéressées. Dispose-t-on de techniques de scénario faciles à appliquer pour introduire les changements du marché ou de la technologie dans l'analyse? Quelle est l'influence de l'évolution technologique et des parts de marché sur le résultat d'une ACV?

Il conviendrait de poursuivre l'élaboration de règles simples en matière de décision, concernant, par exemple, la définition des limites du système. Cela s'applique particulièrement à des activités liées à la biologie, telles que la sylviculture, qui peuvent être considérées comme relevant de l'environnement ou du système économique. Lorsqu'elles sont considérées comme faisant partie du système économique, la lumière solaire, le CO₂, l'H₂O, etc., sont des intrants environnementaux, tandis que lorsque ces activités sont considérées comme faisant partie de l'environnement, la biomasse représente l'intrant. La question principale est la suivante : quelles activités et procédés faut-il ranger parmi les composantes du système de production, d'une part, et parmi celles de l'environnement, d'autre part?

Classification

Il y a lieu de mieux comprendre les flux de matières et leur relation avec les impacts sur l'environnement. A quelle source les données doivent-elles être recueillies et comment faut-il évaluer leur fiabilité? La recherche devrait être intensifiée, notamment en ce qui concerne :

- le développement de la classification et de la caractérisation du «sol», en tenant compte de différentes limites du système et zones de protection;
- le développement de la classification et de la caractérisation des impacts toxicologiques, en tenant compte de différents scénarios d'exposition;
- la mise au point de méthodes pour déterminer les impacts non toxicologiques sur la santé humaine.

Pondération

Comme des valeurs éthiques et idéologiques entrent en jeu dans l'évaluation et qu'un accord sur ce sujet est peu probable dans une société démocratique ouverte, il est vraisemblable que plusieurs méthodes d'évaluation et ensembles de facteurs de pondération pour l'évaluation verront le jour. Afin de découvrir comment différents groupes de personnes évaluent divers aspects, il peut également s'avérer utile de recourir à différentes méthodes d'évaluation et ensembles de facteurs de pondération pour l'évaluation dans des études de cas particulières.

Il est impératif d'apprécier le rôle de la pondération dans l'ACV en :

- élaborant des procédures de pondération, avec la participation de groupes de réflexion;
- créant des méthodes de pondération monétarisées, autrement dit en estimant tous les coûts de la protection ou de la remise en état de l'environnement, de la dépollution du sol ou des systèmes antipollution intégrés;
- évaluant l'applicabilité et l'acceptabilité de méthodes à notation unique de grandeurs physiques, qui sont utilisées, s'il y a lieu, pour comparer l'énergie, l'utilisation des matières ou la production à travers la même procédure et qui expriment les valeurs en MJ ou en kg.

Autres questions méthodologiques

Il est nécessaire de faire appel à de nouvelles techniques analytiques, telles que l'analyse de sensibilité et l'analyse marginale. L'analyse de sensibilité devrait inclure des données provenant de l'analyse de l'inventaire et tous les éléments quantitatifs de l'évaluation de l'impact en cours. Les

résultats pourraient ensuite être introduits dans différents types d'analyses statistiques, en vue de répondre à des questions telles que : la différence entre les systèmes A et B est-elle statistiquement significative ?

L'analyse marginale livre des informations sur les changements globaux qui résultent d'une modification du cycle de vie. Ce type d'analyse est susceptible d'accroître considérablement la valeur d'une ACV. En introduisant divers scénarios (par exemple « Que se passe-t-il si le procédé A est remplacé par le procédé B ? »), il est possible d'obtenir une grande quantité d'informations utiles et intéressantes pour l'analyse de l'amélioration et de nombreuses autres applications de l'ACV.

Les principes et les exigences régissant l'établissement de bonnes bases de données dotées des logiciels appropriés devront être formulés. Des techniques avancées concernant la modélisation et les bases de données pourront être appliquées afin de représenter les entrées et les sorties de l'écosystème dans l'espace et le temps (par exemple en couplant une ACV avec des systèmes d'information géographique). L'harmonisation de la présentation des données, etc., est un élément essentiel.

Étude de cas 4.1

TECHNOLOGIE GÉNÉRIQUE APPLIQUÉE A LA RÉDUCTION DE LA POLLUTION DE L'ENVIRONNEMENT

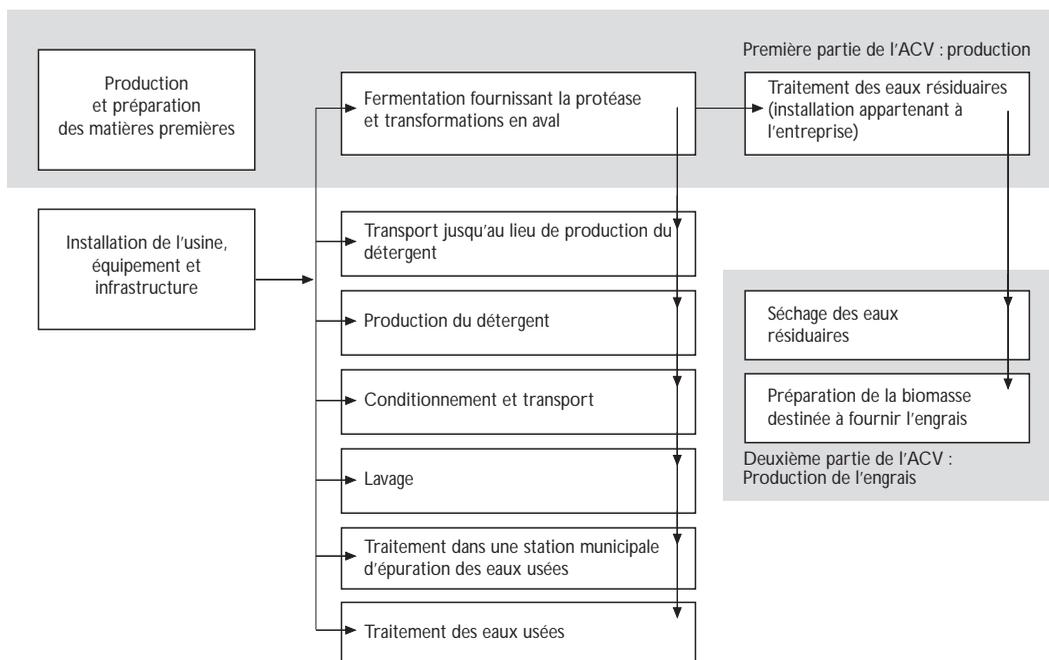
COGNIS GmbH (Henkel) en Allemagne a publié une ACV de protéases pour détergents qui compare la fermentation assurée par des micro-organismes modifiés génétiquement et non modifiés (Bahn et Intemann, 1997).

Les protéases de détergents, qui enlèvent les salissures protéiniques, représentent un ingrédient essentiel des détergents modernes. En raison de leur action catalytique, elles sont utilisées à faible concentration (0.1-1.0 pour cent). Il n'est pas possible d'obtenir un même pouvoir lavant en les remplaçant par d'autres substances ou en élevant la température de lavage. Les micro-organismes qui fournissent les quatre types de protéases sont énumérés ci-dessous :

- P1 : protéase produite par un micro-organisme optimisé selon des procédures de sélection classiques.
- P2 sauvage : protéase fabriquée par un micro-organisme prélevé dans la nature, qui, comparée à l'enzyme de la première génération, possède un pouvoir lavant molaire élevé.
- P2-140 : protéase issue d'une souche modifiée génétiquement. Le gène de la protéase de la deuxième génération a été incorporé dans une souche productrice aux qualités éprouvées.
- P2-170 : cette protéase diffère de la P2-140 par son meilleur rendement au cours de la fermentation, par le fait que son procédé de fabrication a été optimisé sur le plan technique et qu'elle possède une activité enzymatique supérieure dans les granulés.

L'objectif immédiat de l'ACV consistait à déterminer la pollution liée à la production de l'enzyme et à révéler d'éventuelles faiblesses dans cette production. Elle visait ensuite à évaluer les potentialités écologiques des méthodes de génie génétique.

◆ Figure 4.6. *Production de la protéase considérée comme une partie de l'ACV de l'enzyme lessivielle*



L'évaluation n'englobe pas la totalité du cycle de vie des protéases de détergents, mais uniquement la production de l'enzyme (figure 4.6), c'est-à-dire toutes les transformations en jeu depuis la production des matières premières jusqu'à l'obtention du produit fini sous forme de granulés. On a également tenu compte du transport des matières premières utilisées durant la production de l'enzyme, entre les fabricants particuliers et les producteurs d'enzymes. Les bâtiments, les appareils, etc., n'ont pas été pris en considération, la production d'enzymes étant un procédé à forte intensité d'énergie et de matières dans lequel l'infrastructure ne joue qu'un rôle très mineur.

Dans les cas étudiés, la production des protéases ne donne lieu qu'à un seul sous-produit utile, un engrais organique produit à partir de la biomasse résultant de la production des protéases. La pâte subit d'abord un essorage mécanique suivi d'un séchage thermique pour fournir un engrais à haute valeur nutritive.

Les granulés enzymatiques des deux protéases diffèrent par leur activité enzymatique spécifique et par leur pouvoir lavant (PL), selon le degré de saleté, les conditions de lavage et les autres ingrédients présents dans le détergent. Une évaluation purement quantitative ne tiendrait pas compte de ces différentes propriétés. Si bien qu'un PL moyen, correspondant à 1 kg de granulés de P1, a été choisi comme unité fonctionnelle, équivalant en moyenne à six salissures à 30, 45 et 60 °C.

INVENTAIRE

Pour l'inventaire, on calcule généralement les intrants utilisés (matières premières, etc.).

Matières premières

Le tableau 4.8 montre les matières premières qui participent directement à la production de l'enzyme. La fabrication de 1 kg de granulés P1 requiert 3.54 kg de matières premières, et la proportion de matières premières agricoles renouvelables vaut approximativement 50 pour cent. La production d'une quantité de granulés P2-140 dotée d'un pouvoir lavant équivalent ne nécessite que 2.34 kg, si bien que la demande de matières premières se trouve réduite de 34 pour cent.

Tableau 4.8. **Matières premières entrant dans la production des protéases P1, P2 sauvage, P2-140 et P2-170**

| | Unité | P1 | P2 sauvage | P2-140 | P2-170 |
|------------------------------|--------|------|------------|--------|--------|
| Matières premières agricoles | kg/PL* | 1.83 | 24.64 | 1.76 | 1.56 |
| Matières premières minérales | kg/PL* | 1.17 | | 0.44 | 0.38 |
| Matières premières fossiles | kg/PL* | 0.54 | | 0.14 | 0.14 |

PL* = quantité d'enzyme dont le PL correspond à celui de 1 kg de granulés P1.

Demande énergétique

Lorsqu'on analyse la demande énergétique, il convient de faire la distinction entre l'énergie de procédé et l'énergie inhérente. L'énergie de procédé englobe la quantité totale d'énergie primaire qui est finalement « consommée » sous forme d'énergie renouvelable ou fossile. L'énergie inhérente est l'énergie chimique renfermée dans les granulés enzymatiques ou l'engrais. L'énergie inhérente ne se perd pas de façon définitive, mais peut être récupérée dans certaines circonstances. Le tableau 4.9 récapitule la consommation énergétique globale tout au long de la chaîne de production.

Le passage de la production de P1, optimisée à travers une mutagenèse classique, à la production de P2-140 assistée par le génie génétique, a réduit la demande en énergie de procédé de 60 pour cent, soit de 131 MJ/PL à 52 MJ/PL. Une optimisation écologique supplémentaire de la production de l'enzyme s'obtient en substituant P2-170 à P2-140.

Tableau 4.9. **Consommation globale d'énergie primaire sur l'ensemble de la chaîne de production des protéases pour détergents : P1, P2 sauvage, P2-140 et P2-170**

| | Unité | P1 | P2 sauvage | P2-140 | P2-170 |
|---------------------------|--------|-----|------------|--------|--------|
| Énergie de procédé | | | | | |
| Fossile | MJ/PL* | 102 | 397 | 41 | 31 |
| Renouvelable | MJ/PL* | 29 | 182 | 11 | 8 |
| Énergie inhérente | | | | | |
| Fossile | MJ/PL* | 6 | 3 | 3 | 2 |
| Renouvelable | MJ/PL* | 17 | 6 | 6 | 5 |

PL* = quantité d'enzyme dont le PL correspond à celui de 1 kg de granulés P1.

La production actuelle, répondant aux besoins annuels du groupe Henkel, de la quantité de granulés P2-140 qui possède le même pouvoir lavant que la quantité de granulés P1 fabriquée auparavant, s'accompagne d'une économie d'énergie primaire d'environ 420 000 GJ. Ce chiffre correspond à l'énergie primaire consommée chaque année par environ 170 000 foyers ou 380 000 personnes pour laver leur linge.

ÉMISSIONS

Les émissions doivent aussi être calculées, en plus des entrées. Le tableau 4.10 récapitule les émissions globales associées à diverses protéases pour détergents tout au long de leur chaîne de production.

Tableau 4.10. **Émissions globales sur l'ensemble de la chaîne de production des protéases pour détergents : P1, P2 sauvage, P2-140 et P2-170**

| | Unité | P1 | P2 sauvage | P2-140 | P2-170 |
|---|-------|-------|------------|--------|--------|
| Pollution atmosphérique | | | | | |
| Dioxyde de carbone total | g/PL* | 8 507 | 37 376 | 3 422 | 2 571 |
| – Issu des matières premières renouvelables | g/PL* | 1 548 | 12 745 | 849 | 614 |
| – Issu des matières premières fossiles | g/PL* | 6 959 | 24 632 | 2 572 | 1 957 |
| Hydrocarbures | g/PL* | 67 | 331 | 36 | 27 |
| Oxydes de soufre | g/PL* | 60 | 234 | 25 | 19 |
| Oxydes d'azote | g/PL* | 49 | 150 | 15 | 12 |
| Poussières | g/PL* | 24 | 72 | 7 | 5 |
| Monoxyde de carbone | g/PL* | 14 | 21 | 2 | 2 |
| Pollution des eaux résiduaires | | | | | |
| Demande chimique en oxygène | g/PL* | 158 | 1 008 | 77 | 57 |
| Demande biologique en oxygène | g/PL* | 7 | 56 | 4 | 3 |
| Déchets | | | | | |
| Déchets organiques | g/PL* | 1 033 | 3 147 | 313 | 237 |
| Scories/cendres | g/PL* | 98 | 263 | 26 | 19 |

PL* = quantité de granulés dont le PL correspond à celui de 1 kg de granulés P1.

ÉMISSIONS DE DIOXYDE DE CARBONE PROVENANT DES MATIÈRES PREMIÈRES FOSSILES ET RENOUVELABLES

En ce qui concerne les émissions de CO₂, on distingue celles qui procèdent de l'utilisation des matières premières renouvelables de celles issues de la consommation d'énergie fossile, destinée

essentiellement à la production d'électricité et au chauffage. Ainsi, les granulés P1 entraînent un rejet de 6.96 kg de CO₂ et les granulés P2-140 un rejet de 2.57 kg de CO₂, et ce pour un pouvoir lavant équivalent à celui de 1 kg de P300, dans les deux cas. Une quantité considérable de CO₂ (par exemple, 1.55 kg de CO₂ par kg de granulés P1 = 20 pour cent de la totalité des émissions de CO₂) se forme aussi au cours de la biodégradation des matières premières renouvelables durant la fermentation et l'épuration aérobie des eaux usées.

Compte tenu de la demande annuelle de l'entreprise, le recours à la nouvelle enzyme produite à partir d'organismes recombinés a permis d'abaisser les émissions annuelles d'environ 30 000 tonnes pour le CO₂, 170 tonnes pour le carbone et 190 tonnes pour le dioxyde de soufre.

ÉVALUATION DE L'IMPACT

Dans le cas des évaluations fondées sur des critères environnementaux, les données relatives aux émissions sont compilées en fonction de leur relation avec une série sélectionnée d'incidences sur l'environnement (tableau 4.11). Si possible, les différentes émissions sont pondérées à l'aide de facteurs scientifiquement éprouvés, publiés par le *Umweltbundesamt* (autorités allemandes chargées de l'environnement), afin de prendre en considération les divers types d'impacts.

Dans le cadre de cette ACV, les émissions atmosphériques ont été estimées du point de vue de leur impact sur le réchauffement de la planète et sur la formation des pluies acides et du smog. Les émissions dans l'eau ont été évaluées d'après la quantité de nutriments dans l'eau et la consommation d'oxygène associée. Les déchets ont été divisés en deux catégories selon le degré de pollution, faible ou élevé, qu'ils engendrent. Les évaluations d'impact confirment clairement l'affirmation générale selon laquelle l'utilisation d'une souche recombinée peut réduire d'un facteur 3 à 4 la consommation d'énergie et de ressources ainsi que la pollution due aux émissions.

Tableau 4.11. **Évaluation des émissions et des déchets issus de la production de protéases pour détergents en fonction de critères relatifs à l'environnement**

| | Facteur : CO ₂ | Unité | P1 | P2 sauvage | P2-140 | P2-170 |
|------------------------------------|---------------------------|------------------------|-------|------------|--------|--------|
| Réchauffement de la planète | | | | | | |
| Dioxyde de carbone | 1 | g CO ₂ /PL* | 8 507 | 37 376 | 3 422 | 2 571 |
| Hydrocarbures | 20.5 | g CO ₂ /PL* | 1 383 | 6 778 | 729 | 556 |
| | Facteur : SO ₂ | Unité | P1 | P2 sauvage | P2-140 | P2-170 |
| Pluies acides | | | | | | |
| Dioxyde de soufre | 1 | g SO ₂ /PL* | 60 | 234 | 25 | 19 |
| Oxyde d'azote | 0.7 | g SO ₂ /PL* | 35 | 105 | 11 | 8 |
| | | Unité | P1 | P2 sauvage | P2-140 | P2-170 |
| Formation de smog | | | | | | |
| Hydrocarbures | | g/PL* | 67 | 331 | 36 | 27 |
| Poussières | | g/PL* | 24 | 72 | 7 | 5 |
| Monoxyde de carbone | | g/PL* | 14 | 21 | 2 | 2 |
| | Facteur : PO ₄ | Unité | P1 | P2 sauvage | P2-140 | P2-170 |
| Consommation d'oxygène | | | | | | |
| Amoniac | 0.32 | g/PO ₄ /PL* | 6 | 62 | 4 | 3 |
| Oxyde d'azote | 0.13 | g/PO ₄ /PL* | 6 | 20 | 2 | 1 |
| CBS | 0.02 | g/PO ₄ /PL* | 3 | 22 | 2 | 1 |
| | | Unité | P1 | P2 sauvage | P2-140 | P2-170 |
| Déchets | | | | | | |
| Pollution élevée | | g/PL* | 1 131 | 3 410 | 338 | 256 |
| Pollution faible | | g/PL* | 3 | 5 | 1 | 1 |

PL* = quantité de granulés dont le PL correspond à celui de 1 kg de granulés P1.

Étude de cas 4.2

PRODUCTION D'ÉTHANOL**DÉFINITION DE L'OBJECTIF**

Cette étude de cas compare la production de bio-éthanol à la synthèse d'éthanol. Elle visait à établir la faisabilité théorique d'une ACV portant sur des produits d'origine biotechnologique et à fournir une description du système et des conditions régissant ses limites, ainsi qu'une interprétation des résultats. L'étude se compose des éléments suivants :

- L'inventaire de l'éthanol produit selon des procédés biotechnologiques a été évalué et comparé avec celui de l'éthanol de synthèse.
- Les données de référence relatives au bio-éthanol sont très minces et variables en fonction des matières premières utilisées et de leurs sources. Il s'ensuit que l'interprétation des résultats reflète ces tendances.
- Cette étude est limitée à la production d'éthanol. Il est permis de supposer que les procédés comparés débouchent sur des produits remplissant les mêmes fonctions et que leur consommation et leur élimination se déroulent dans les mêmes conditions.
- Des conclusions ont été tirées à propos des paramètres environnementaux « utilisation des ressources énergétiques » et « émissions atmosphériques sélectionnées ». Seule une étude plus globale pourrait traiter correctement le facteur « utilisation des sols », qui est important du point de vue des matières premières renouvelables.
- Les auteurs ont cherché à mettre en évidence le potentiel de réduction de la pollution qui pouvait être déduit de cette étude de cas succincte.

DESCRIPTION DU SYSTÈME ET PORTÉE DE L'ÉTUDE

Le tableau 4.12 montre les propriétés physiques de l'éthanol. En principe la voie de production n'a aucune incidence sur les propriétés.

Tableau 4.12. **Propriétés physiques de l'éthanol**

| Propriétés | Valeur |
|---|-----------------------|
| Formule empirique | C_2H_5OH |
| Masse molaire relative | 46 kg/kmole |
| Teneur en carbone | 52.2 % du poids |
| Teneur en carbone calculée en fonction du CO_2 pour de l'éthanol à 94.5 % | 1.81 kg |
| Pouvoir calorifique H_u | 26.8 MJ/kg |
| Densité | 793 kg/m ³ |

PRODUCTION BIOTECHNOLOGIQUE DE L'ÉTHANOL A PARTIR DE LA CANNE A SUCRE

La voie de production comporte les étapes suivantes : la fermentation de la source de carbone, la conversion biotechnologique en éthanol et la distillation de celui-ci. Les glucides (glucose et saccharose) tirés, par exemple, de la canne à sucre, de la betterave sucrière, des céréales, de plantes cultivées pour leur racine, du bois et des liqueurs résiduelles, forment la source de carbone. Deux cas de la production de bio-éthanol sont exposés : l'élaboration à partir de la canne à sucre et des céréales.

En automne 1996, le *Institut für Kunststoffprüfung und Kunststoffkunde* (IKP) a effectué les recherches destinées à cette étude (IKP Université de Stuttgart, 1996a), en s'appuyant à la fois sur des publications (Crueger et Crueger, 1990; Ward, 1994; Dellweg, 1987; Osteroth, 1992; ETH Zurich, 1994) et sur des communications orales à propos de la culture de la canne à sucre et de sa transformation en éthanol. La production est réalisée au Brésil. Il faut tenir compte des aspects suivants :

- Les champs sont souvent brûlés avant la récolte, afin de faciliter cette dernière. Cette pratique s'accompagne d'émissions considérables. Comme elle tend à se perdre, ces émissions n'ont pas été prises en considération.
- La demande en énergie primaire provenant de matières premières renouvelables a été limitée à la canne à sucre. Toute autre biomasse produite durant la culture n'a pas été prise en considération.
- On a estimé l'utilisation des véhicules agricoles durant la période de croissance et la récolte, mais pas l'infrastructure nécessaire.
- On peut s'attendre à voir le développement d'émissions sur les champs fertilisés. Aucune information n'était disponible à ce sujet. L'étude n'a pas non plus couvert la pollution des eaux souterraines par les engrais.

Les conditions régissant les limites dans le cas de la culture de la canne à sucre sont présentées au tableau 4.13 et l'inventaire des opérations au tableau 4.14.

Tableau 4.13. **Données de référence pour l'ACV**

| Paramètres concernant la culture de la canne à sucre | Valeur/unité |
|--|-------------------------------|
| Utilisation d'engrais | 1.6 MJ/kg de canne à sucre |
| Machines/transport : | |
| Consommation de carburant | 0.067 l/kg de canne à sucre |
| Autres machines | 0.095 kWh/kg de canne à sucre |
| <i>Source</i> : Bernhardt et Menrad, 1979. | |

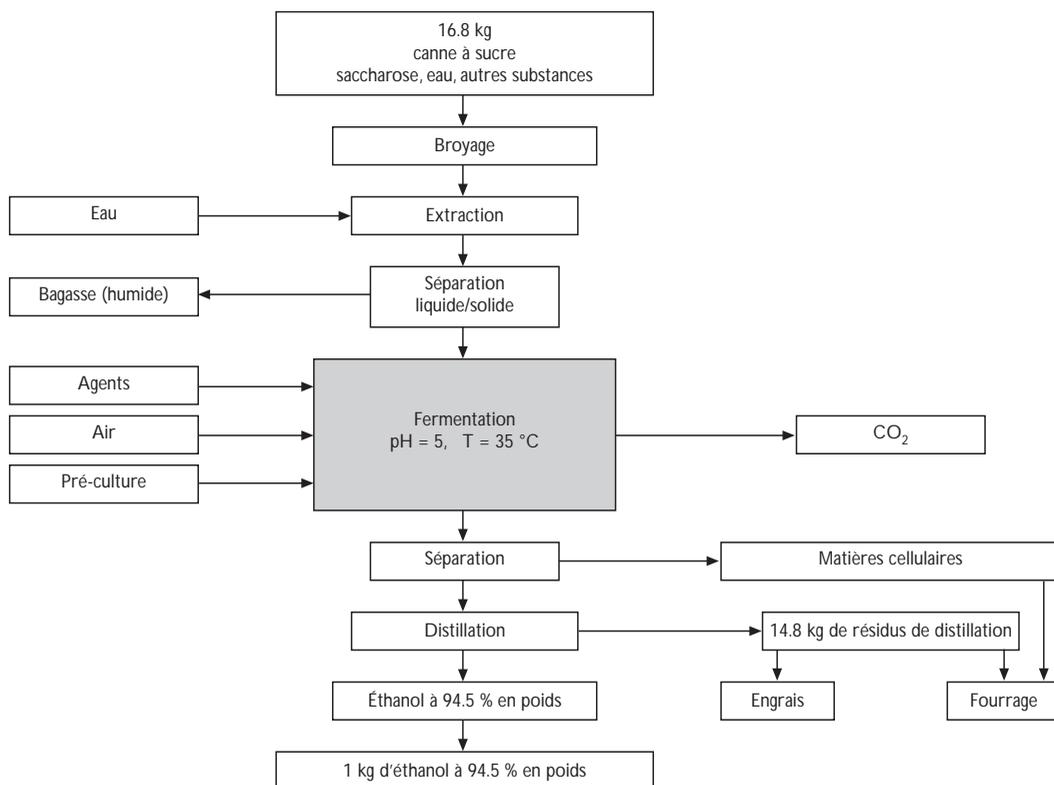
Tableau 4.14. **Inventaire des opérations mises en œuvre dans la culture de la canne à sucre**

| Opération | Paramètre |
|-----------------------|--|
| Utilisation d'engrais | Calculée en fonction des engrais azotés |
| Machines/transport : | |
| Autres machines | Machines agricoles mues au gazole, calculé d'après le gazole consommé par le transport en camion |
| Autres machines | Consommation de courant |

L'éthanol est produit à l'aide de levures. Le procédé de production de l'éthanol à partir de la canne à sucre se déroule comme indiqué ci-après. Lorsque la canne à sucre a été broyée (moulins à cannes composés de cylindres), son jus en est extrait par pression humide. Le rendement en saccharose atteint 99 pour cent. La bagasse est ensuite séparée du jus de canne à sucre qui servira de produit de départ. Durant l'étape de fermentation (milieu légèrement acide, pH = 5, T = 28 °C), le saccharose est converti par la levure en éthanol, en dioxyde de carbone et en petites quantités de glycérine. Au cours de l'étape de la séparation, le liquide est isolé de la biomasse, qui retourne au fermenteur. A l'issue de la distillation, on obtient de l'éthanol à 94.5 degrés. Le résidu de distillation qui en résulte peut être utilisé comme engrais ou comme fourrage.

L'analyse des flux massiques exposés à la figure 4.7 commence à la récolte de la canne à sucre et s'achève à l'obtention d'éthanol. Les paramètres repris ci-après devraient être pris en considération lors de la réalisation d'une ACV.

◆ Figure 4.7. Flux massiques de la production biotechnologique d'éthanol



Source : IKP, University of Stuttgart, 1996a.

La combustion de la bagasse assure l'autosuffisance énergétique de la production d'éthanol, depuis le broyage de la canne à sucre jusqu'à l'obtention d'éthanol à 94.5 pour cent. Les crédits, destinés par exemple à la fourniture d'énergie à des tiers, n'ont pas été inclus. A l'exception du CO₂, les émissions résultant de la combustion de la bagasse sont calculées à l'aide de facteurs d'émission se rapportant à la combustion du bois selon l'écoinventaire des systèmes énergétiques (ETH Zurich et Labor für Energiesysteme, 1994). Il n'a pas été possible d'obtenir des informations relatives à la combustion de la bagasse.

La masse de CO₂ prélevée de l'atmosphère environnant le champ de canne à sucre n'a pas été prise en considération. Seules les molécules de CO₂ entrant dans la composition de l'éthanol, soit 1.81 kg de CO₂/kg d'éthanol (94.5 pour cent), ont été portées au crédit du produit.

La production d'un kg d'éthanol fournit environ 14.8 litres de résidus de distillation, qui sont rejetés dans les eaux ou épandus comme engrais. Il peuvent également être transformés en fourrage. On a supposé que ce produit était utilisé, mais les paramètres environnementaux le concernant n'ont pas été ventilés.

Cette étude de cas n'a pas traité la pollution de l'eau et du sol, en raison du manque d'informations.

Les données de référence ont été extraites des études de Morris et Ahmed (1992) et de Lorenz et Morris (1995). Les données énergétiques concernant le cas de la « moyenne industrielle » ont été rapportées aux procédés correspondants de la base de données GaBi Progress 2.0 (IKP, Université de Stuttgart, 1996b). Les différences essentielles sont les suivantes :

- la fertilisation et l'irrigation demandent plus d'énergie que la culture de la canne à sucre ;
- l'énergie de procédé nécessaire à la production d'éthanol est fournie par les réseaux de distribution publics ou par une production de vapeur dans l'usine même.

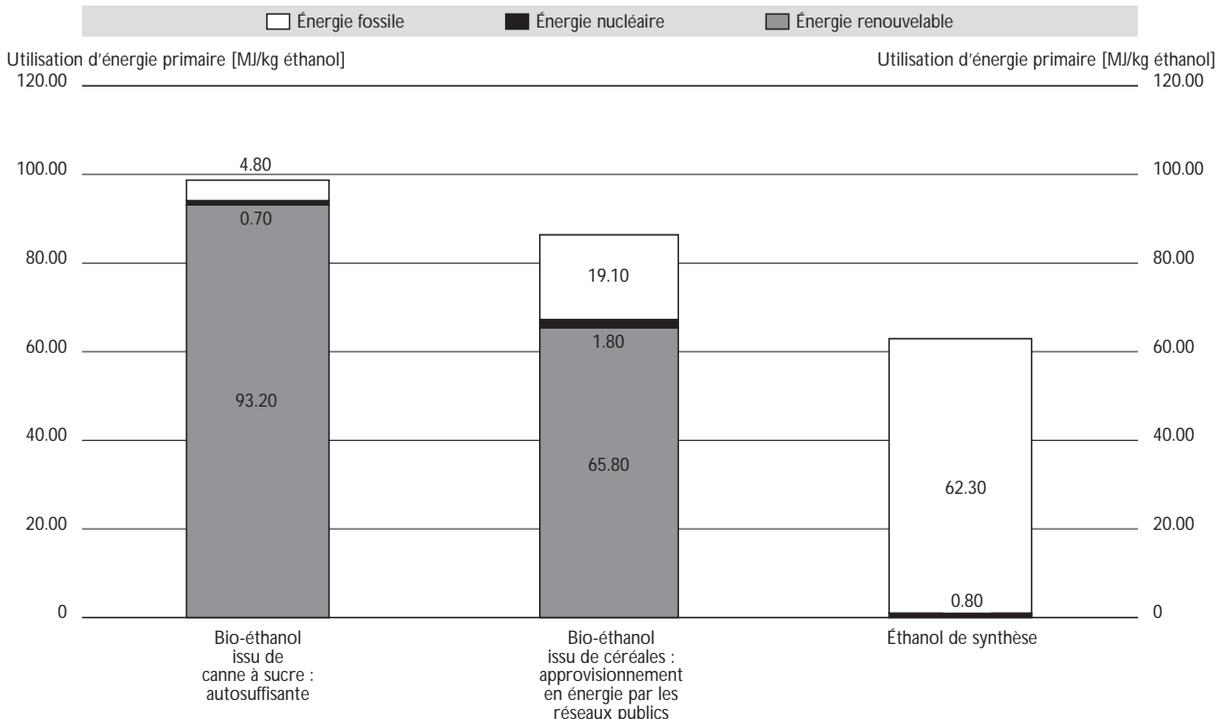
En comparant les données relatives à l'éthanol produit à partir de la canne à sucre et des céréales avec les valeurs citées dans d'autres études, par exemple celle de Parisi (1983), on a réalisé un dépouillement exhaustif des études de la production d'éthanol à partir de la canne à sucre, de la betterave sucrière, des céréales et d'autres matières premières. Elles coïncident avec une certaine dispersion.

L'éthanol de synthèse est produit à partir de l'éthylène par hydratation catalytique. L'hydratation directe s'effectue en présence d'acide sulfurique. L'ester résultant est hydrolysé. Les données concernant la synthèse de l'éthanol ont été obtenues auprès de l'industrie et correspondent à l'année 1995 (IKP, Université de Stuttgart, 1996b).

RÉSULTATS

En respectant les conditions régissant les limites, il est possible d'évaluer les résultats en vue de cerner des tendances. Les résultats exposés à la figure 4.8 indiquent la demande en énergie primaire.

◆ Figure 4.8. *Demande d'énergie primaire pour la production de bio-éthanol et d'éthanol de synthèse*



Source : Auteur.

L'énergie issue d'une source renouvelable (énergie solaire) assimilée à travers la canne à sucre ou des céréales est dite «renouvelable». Les autres sources d'énergie essentielle sont fossiles, il s'agit du pétrole brut et du gaz naturel.

La production d'éthanol à partir des matières premières renouvelables consomme une très grande quantité d'énergie, dont la majeure partie est cependant renouvelable. Dans le cas de la canne à sucre, on a considéré que le procédé était autosuffisant sur le plan énergétique et que la production ne nécessitait qu'un faible apport d'énergie fossile. La demande associée à l'engrais, au transport et aux machines s'élève environ à 6 MJ/kg d'éthanol. La demande énergétique est globalement inférieure dans le cas des céréales, car la pollution de l'environnement est imputable à des produits connexes, et en raison d'un approvisionnement énergétique extérieur. Si bien que la quantité d'énergie fossile requise s'élève à quelque 19 MJ/kg d'éthanol.

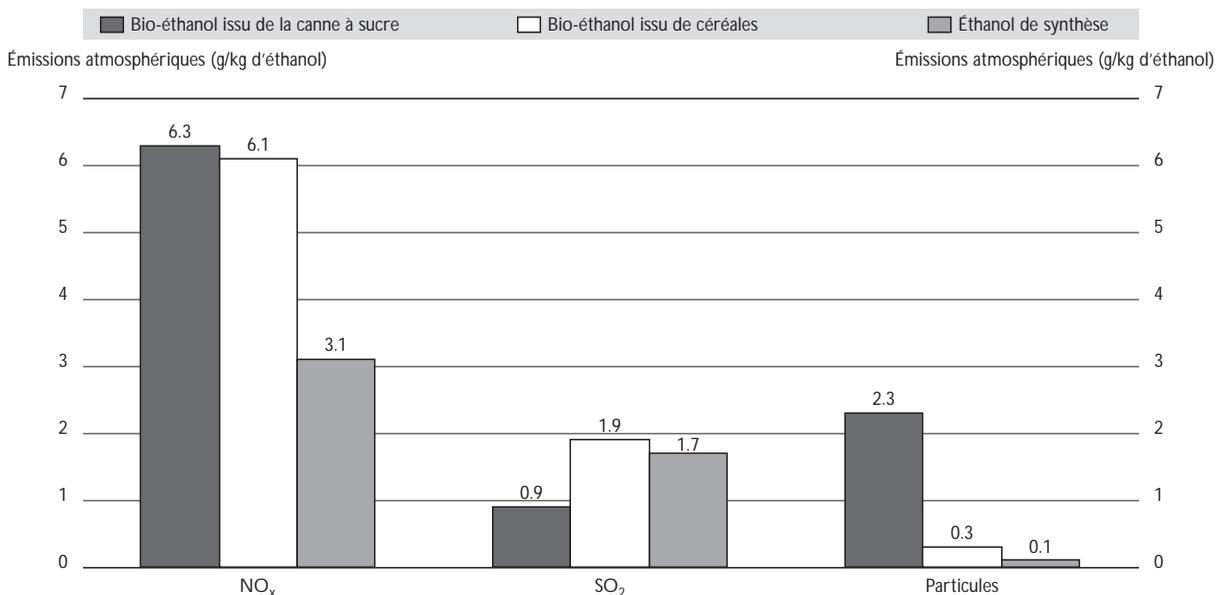
La synthèse de l'éthanol utilise du pétrole brut et du gaz naturel comme sources de carbone. Les étapes du procédé de synthèse, à savoir le raffinage, le vapocraquage pour la production d'éthylène et la synthèse proprement dite, consomment 62 MJ d'énergie fossile par kg d'éthanol.

La consommation d'énergie renouvelable est jugée plus favorable à l'environnement que la consommation d'énergie fossile non renouvelable. Ainsi, du point de vue de la consommation d'énergie primaire, en dépit d'une quantité plus élevée, la production de bio-éthanol est supérieure à la production d'éthanol synthétique.

S'agissant des émissions de CO₂, la production biotechnologique est assortie d'avantages et ce, même en prenant des hypothèses simplifiées à l'extrême. Le bio-éthanol constitue un puits de CO₂ et ce phénomène est encore plus marqué avec le sucre de canne qu'avec les céréales.

Le brûlage de matières premières renouvelables chargées d'humidité dégage nettement plus de monoxyde de carbone (CO). Du point de vue de ce facteur environnemental qui n'a cependant qu'un impact local, l'élaboration du bio-éthanol s'accompagne d'émissions bien plus élevées (27 g/kg) que la synthèse de l'éthanol qui n'engendre que 0.4 g/kg.

◆ Figure 4.9. Émissions atmosphériques engendrées par la production de bio-éthanol et d'éthanol de synthèse



Pour ce qui est des autres émissions atmosphériques, les résultats sont moins tranchés. La figure 4.9 reprend certaines émissions.

Dans le cas de la canne à sucre, c'est la combustion de la bagasse et la culture de la canne qui engendrent les émissions atmosphériques. S'agissant des céréales, les sources d'émission sont la culture et l'énergie de procédé. Pour l'éthanol de synthèse, les émissions résultent de l'extraction et du traitement du pétrole brut ou du gaz naturel et de l'énergie requise par ces opérations. Le bio-éthanol et l'éthanol de synthèse se situent dans la même gamme, pour des paramètres tels que le dioxyde de soufre. Du point de vue de l'émission de particules, le brûlage de matières humides (comme pour les émissions de CO) désavantage la canne à sucre, mais pas les céréales. La transformation de la canne à sucre et des céréales dégage plus d'oxyde d'azote que le procédé de synthèse, parce qu'elle peut tirer profit de l'énergie de procédé.

BIBLIOGRAPHIE

- AHBE, S., A. BRAUNSCHWEIG, et R. MÜLLER-WENK (1991), «Ökobilanz von Packstoffen Stand 1990, Schweizer Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft BUWAL» (Schriftenreihe Umwelt n° 132, 1996 version n° 250), Bern.
- AMBIENTE ITALIA, GOTHENBURG RESEARCH INSTITUTE, INSTITUT FÜR ÖKOLOGISCHE WIRTSCHAFTSFORSCHUNG, et OEKOSCIENCE (1997), «Anwendung von Ökobilanzen in ausgewählten Staaten Europas», Milan, Gothenberg, Heidelberg, Zurich.
- ATLANTIC CONSULTING, ERNST et YOUNG, et SCIENCE POLICY RESEARCH UNIT (1996), «The Adoption by Industry of Life Cycle Approaches: Its Implications for Competitiveness, Innovation and Trade», exposé présenté à la Conférence LCA, 21-22 octobre 1996, Commission européenne, Bruxelles.
- BAHN, M. et K. INTEMANN (1997), «Vergleichende Ökobilanz von Waschmittel-Proteasen der ersten und zweiten Generation», COGNIS GmbH, Düsseldorf, communication personnelle.
- BERNHARDT, W. et H. MENRAD (VAW AG Wolfsburg) (1979), «Äthanol aus Biomasse als Kraftstoff für Automobile», dans H. Dellweg (éd.), *Tagungsband zu: Viertes Symposium Technische Mikrobiologie Anaerobe Fermentationen – klassische Prozesse mit neuen Aussichten*, Verlag Versuchs – und Lehranstalt für Spiritusfabrikation und Fermentationstechnologie im Institut für Gärungsgewerbe und Biotechnologie, Berlin.
- CONSEIL NORDIQUE DES MINISTRES (éd.) (1992), *Product Life Cycle Assessment: Principles and Methodology*, Copenhagen.
- CRUEGER, W. et A. Crueger (1990), *Biotechnology: A Textbook of Industrial Biotechnology*, 2^e édition, Sinauer Ass. Inc., Sunderland, Massachusetts.
- DELLWEG, H. (1987), «Biotechnologie: Grundlagen und Verfahren», VCH Verlagsgesellschaft, Weinheim, pp. 4-6, 110-116.
- ETH ZÜRICH et LABOR FÜR ENERGIESYSTEME (1994), *Ökoinventar für Energiesysteme*, Zurich.
- FINNVEDEN, G. (1996), «Life-Cycle Impact Assessment and Interpretation», LCANET project theme report, draft version 1.0, 14 octobre.
- FÖRSTER, R. (1994), «Spp-Projekt: Ökobilanz, Évaluation und Weiterentwicklung von Bewertungsmethoden», Poster, Burgdorf, dans A. Braunschweig, «Evaluation of Existing Impact Assessment Methods», dans Braunschweig et al. (1996), *Developments in LCA Valuation*, St Gallen, Institut für Wirtschaft und Ökologie an der Hochschule St. Gallen (IWÖ), Discussion contribution n° 32, pp. 7-15.
- GIEGRICH, J. et al. (1995), «Bilanzbewertung in produktbezogenen Ökobilanzen. Évaluation von Bewertungsmethoden», dans Umweltbundesamt (éd.), *Methodik der produktbezogenen Ökobilanzen – Wirkungsbilanz und Bilanzbewertung*, UBA (UBA-Texte 23/1995), Berlin.
- GROTZ, S. et F. RUBIK (1996), *Bibliographie Ökobilanzen*, Schriftenreihe des Instituts für ökologische Wirtschaftsforschung, Berlin.
- HEIJUNGS, R. (1992), *Environmental Life Cycle Assessment of Products, Guide, National Re-use of Waste Research Programme NOH*, n° 9266, Pays-Bas.
- HOFSTETTER, P. (1996), «Towards a structured aggregation procedure», dans Braunschweig et al., *Developments in LCA Valuation*, Institut für Wirtschaft und Ökologie an der Hochschule St Gallen (IWÖ), Discussion contribution n° 32, pp. 123-211.
- IKP INSTITUT FÜR KUNSTSTOFFPRÜFUNG UND KUNSTSTOFFKUNDE DER UNIVERSITÄT STUTTGART (1996a), «Datensammlung zur biotechnologischen Ethanol synthese» (non publié), Stuttgart.
- IKP INSTITUT FÜR KUNSTSTOFFPRÜFUNG UND KUNSTSTOFFKUNDE DER UNIVERSITÄT STUTTGART (1996b), GaBi 2.0 Progress, Software zur Ganzheitlichen Bilanzierung und Dokumentation, Stuttgart.

- IÖW INSTITUT FÜR ÖKOLOGISCHE WIRTSCHAFTSFORSCHUNG (1995), *Umfrage zum Anwendungsstand von Produkt-Ökobilanzen in Deutschland*, Heidelberg.
- ISO 14040 (1997), «Environmental Management – Life Cycle Assessment – Principles and Framework».
- ISO 14041 (1997), «Environmental Management – Life Cycle Assessment – Goal and Scope Definition and Inventory Analysis» (version préliminaire international standard ISO/DIS 14041).
- ISO 14042 (1997), «Environmental Management – Life Cycle Assessment – Life Cycle Impact Assessment» (version préliminaire de comité ISO/CD 14042.2).
- ISO 14043 (1997), «Environmental Management – Life Cycle Assessment – Life Cycle Interpretation» (version préliminaire de comité ISO/CD 14043.2).
- KLÖPFFER, W. (1996), «Allocation Rule for Open-Loop Recycling in Life Cycle Assessment: A Review», *The International Journal Of Life Cycle Assessment*, vol 1:1, Ecomed Publishers, pp. 27-31.
- KLÖPFFER, W. et I. RENNER (1995), «Methodik der Wirkungsbilanz im Rahmen von Produkt-Ökobilanzen unter Berücksichtigung nicht oder nur schwer quantifizierbarer Umwelt-Kategorien», dans Umweltbundesamt (éd.), *Methodik der produktbezogenen Ökobilanzen – Wirkungsbilanz und Bilanzbewertung*, UBA (UBA-Texte 23/1995), Berlin.
- KOTHUIS, B. et F. SCHELLEMAN (1996), «Environmental Economic Comparison of Biotechnology with Traditional Alternatives», Institute for Applied Environmental Economics (TME), La Haye, mai.
- LCANET BOARD et U. DE HAES (président) (1996), «Definition Document», Leyden, 17 juillet.
- LORENZ, D. et D. MORRIS (1995), «How Much Energy Does it Take to Make a Gallon of Ethanol?», Institute for Local Self-Reliance, Environmentally Sound Economic Development, Washington, DC.
- MORRIS, D. et I. AHMED (1992), «How Much Energy Does it Take to Make a Gallon of Ethanol?», Institute for Local Self-Reliance, Environmentally Sound Economic Development, Washington, DC.
- NOVO NORDISK (1995), *Environmental Report 1995*, Bagvaerd, Danemark.
- NOVO NORDISK (1997), Conférence par Gitte Pedersen, Novo Nordisk A/S, «Environmental Aspects of the Application of Catalase for Bleach Clean Up».
- OBERBACHER, B. et al. (1974), «Abbaubare Kunststoffe und Müllprobleme», *Beiträge zur Umweltgestaltung*, Heft A 23, Erich-Schmidt-Verlag, Berlin.
- OCDE (1995), *The Life Cycle Approach: An Overview of Product/Process Analysis*, OCDE, Paris.
- OOSTERHUIS, F., F. RUBIK, et G. SCHOLL (1996), *Product Policy in Europe: New Environmental Perspectives*, Kluwer, Dordrecht.
- OSTEROTH, D. (1992), *Biomasse Rückkehr zum ökologischen Gleichgewicht*, pp. 190-229, «Bioethanol und was dahinter steckt», Springer-Verlag, Heidelberg, chapitre 4.
- PARISI, F. (1983), «Energy Balances for Ethanol as a Fuel. Advances in Biochemical Engineering», *Biotechnology* 28, pp. 42-68.
- PROJEKTGEMEINSCHAFT LEBENSWEGBILANZEN (1992), «Methode für Lebenswegbilanzen von Verpackungssystemen», appendice IV, dans Umweltbundesamt (éd.), *Ökobilanz für Getränkeverpackungen*, (UBA-Texte 52/1995), Berlin.
- RUBIK, F. et V. TEICHERT (1997), *Ökologische Produktpolitik*, Schäffer-Poeschel, Stuttgart.
- SCHMIDT-BLEEK, F. (1993), *Wieviel Umwelt braucht der Mensch? MIPS – Das Maß für ökologisches Wirtschaften*, Birkhäuser Verlag, Berlin.
- SOCIETY OF ENVIRONMENTAL TOXICOLOGY AND CHEMISTRY (SETAC) (1993a), «Reference Material for International Standards Organisation (ISO)/Technical Committee 207/Subcommittee 5/Working Group 1».
- SOCIETY OF ENVIRONMENTAL TOXICOLOGY AND CHEMISTRY (SETAC) (1993b), «Guidelines for Life-Cycle-Assessment: A 'Code of Practice'», SETAC Workshop, Sesimbra, Portugal, 31 mars-3 avril 1993, Bruxelles.
- UMWELTBUNDESAMT (éd.) (1995), *Ökobilanz für Getränkeverpackungen*, UBA (UBA-Texte 52/1995), Berlin.
- WARD, O.P. (1994), *Bioreaktionen: Prinzipien, Verfahren, Produkte*, Springer-Verlag, Heidelberg, pp. 149-153.
- WRISBERG, N. (1997a), «LCANET Workshops in Noordwijkerhout», *LCA-News*, 7 janvier.
- WRISBERG, N. (1997b), «Position of LCA», présentation à la Seventh Annual SETAC-Europe Meeting, LCA short course, 6 avril 1997, Amsterdam.

ATTITUDES ET SENSIBILISATION DU PUBLIC*

- **Il est nécessaire d'informer le public et ses représentants nationaux de l'intérêt des technologies propres et du rôle de la biotechnologie dans la viabilité écologique de l'industrie.**
- **L'attitude du public à l'égard de la biotechnologie et sa connaissance de la question varient considérablement d'un pays à l'autre.**
- **Des actions dynamiques visant les faiseurs d'opinion des médias et le public n'ayant pas de connaissances techniques particulières devront être entreprises afin de promouvoir une meilleure compréhension de la biotechnologie et d'atteindre différents groupes de population.**
- **Il est nécessaire de récolter des informations plus abondantes et de meilleure qualité sur les attitudes du public vis-à-vis des produits de la biotechnologie.**
- **Il y a lieu de concevoir des programmes éducatifs destinés à renforcer la compréhension scientifique à tous les niveaux.**

L'attitude du public et la pression qu'il exerce composent l'un des plus puissants vecteurs de l'introduction de produits et procédés propres, notamment ceux issus de la biotechnologie moderne. Un examen de l'opinion du grand public sur les produits et procédés non polluants et de leur relation avec la biotechnologie moderne cadre donc parfaitement avec le présent rapport, de même que l'étude des mesures qui permettraient d'améliorer la compréhension des questions en jeu par le public.

Au cours des années 60, la montée des préoccupations environnementales était suscitée essentiellement par des problèmes comme les sources de pollution, la dissémination des pesticides, la pollution atmosphérique dans certaines villes et les marées noires. Le champ des préoccupations s'est élargi depuis, en partie à cause de l'augmentation du nombre de pays en voie d'industrialisation. Elles s'expriment également à travers une approche systémique et sont désormais axées sur l'intégrité de l'écosystème planétaire.

Il y a lieu d'appuyer selon diverses modalités et dans différents secteurs de la société les efforts visant à repenser et à refaçonner les procédés industriels dans cette perspective élargie. Ces efforts doivent également gagner l'acceptation des populations à travers le monde.

LA BIOTECHNOLOGIE PEUT-ELLE CONTRIBUER A CE PROCESSUS?

Les quatre premiers chapitres ont amplement démontré que la biotechnologie possédait les potentialités nécessaires pour ouvrir la voie à cette réorientation fondamentale. Sa caractéristique fondamentale est d'opérer en harmonie et non en conflit avec la nature. Des solutions biotechnologiques et autres pourraient se substituer aux technologies existantes qui polluent la biosphère et/ou épuisent les ressources non renouvelables. Une stratégie à même de réduire l'impact de ces technologies améliorera incontestablement la qualité de l'environnement naturel.

* Ce chapitre a été rédigé sous la responsabilité du Dr B. Dixon (Royaume-Uni).

De nombreux membres (mais pas la totalité) de la communauté scientifique soutiennent par ailleurs que les manipulations génétiques qui font partie de la biotechnologie moderne ne sont pas si radicalement nouvelles que leur retombées s'accompagnent d'incertitudes insondables et sans précédent. C'est pourquoi les scientifiques poussent les autorités chargées de la réglementation, qui pendant plusieurs années ont traité les produits issus de manipulations génétiques différemment des autres produits, de réorienter la réglementation afin qu'elle soit axée sur les produits et non sur leur procédé de fabrication.

Par suite, l'idée d'une technologie propre fondée sur des processus biologiques est susceptible de remporter l'adhésion du public. Toutefois la biotechnologie moderne soulève encore quelques inquiétudes parmi la population, en particulier lorsqu'il s'agit de consommer des aliments produits à l'aide d'organismes recombinés. Dans certains pays, ce souci a conduit la population à demander un étiquetage particulier pour les aliments et d'autres produits. Le public a plus de chances d'être réceptif à la biotechnologie lorsqu'elle est employée pour améliorer la santé humaine ou pour réduire l'impact des procédés industriels sur l'environnement.

Encadré 5.1. Les écologistes sont favorables au bio-éthanol

Iogen est une entreprise canadienne de biotechnologie située à Ottawa, qui fabrique des enzymes capables de métaboliser du bois de rebut et des résidus de cultures en sucre, qui est ensuite transformé en éthanol. Lorsque Petro-Canada, qui est l'une des plus grandes compagnies pétrolières canadiennes, a annoncé récemment qu'elle investirait de l'argent et son expérience en matière de raffinage dans une association avec Iogen, qui se concrétiserait notamment par la construction, l'année prochaine, d'une installation d'essai de l'éthanol d'un montant compris entre 15 et 30 millions de dollars, par le financement conjoint d'un programme de R-D et par une option de licence pour la construction de raffineries d'éthanol en vraie grandeur, les groupes d'écologistes ont réagi avec enthousiasme.

Un porte-parole du Sierra Club a déclaré : « Cela marque l'émergence d'une nouvelle industrie de l'énergie. Petro-Canada a effectué un investissement judicieux. J'espère qu'elle gagnera beaucoup d'argent, de même qu'Iogen ». Le Sierra Club milite contre les combustibles qui engendrent des gaz à effet de serre et concourent ainsi au réchauffement de la planète. « C'est très stimulant » a déclaré un expert en énergie de chez Energy Probe, un groupe implanté à Toronto qui soutient les sources d'énergie de remplacement. « Nous faisons partie depuis longtemps du *fan club* de cet éthanol à base de cellulose. » Le Pembina Institute, un autre groupe qui s'intéresse à la question du réchauffement planétaire, a déclaré : « Nous avons rarement l'occasion d'entendre de bonnes nouvelles à propos du changement climatique au Canada. Ceci en est une. Même les grandes compagnies pétrolières peuvent apprécier l'avantage économique que présente la réduction des émissions de gaz à effet de serre. L'éthanol ne résoudra pas complètement le problème, mais il y contribuera certainement, avec toute une série d'autres mesures comme l'augmentation du rendement des combustibles. »

Les deux entreprises soutiennent que ce procédé de haute technologie (qui fera appel à des enzymes modifiées génétiquement pour convertir une cellulose bon marché en éthanol) pourrait les placer en tête de la course au remplacement des carburants fossiles dans le secteur des transports au Canada.

Le développement de technologies propres, exploitant des processus biologiques, n'est pas nouveau en soi. Ces technologies ne comportent donc pas le même degré d'incertitude et de danger imprévu potentiel que de nombreuses autres évolutions du passé. Cet aspect des technologies propres ou des biotechnologies ne garantit certes pas l'adhésion du public, et ce n'est d'ailleurs pas son rôle. Il existe toutefois une différence considérable entre la maîtrise de processus enzymatiques, microbiologiques et autres qui se déroulent déjà dans la biosphère, et l'introduction d'une technologie fondée sur des procédés qui s'écartent radicalement de ce qui a été fait précédemment.

Il convient cependant de préciser plusieurs points importants, qui concernent en particulier les mesures destinées à améliorer la compréhension de la biotechnologie par le public. De même que la biodépollution, par exemple, ne devrait pas être présentée comme étant toujours la meilleure solution pour assainir l'environnement et éliminer les déchets, il ne faudrait pas offrir une image fautive de la biotechnologie en général en la préconisant systématiquement comme une panacée universelle. Dans certains cas, la biotechnologie ne constituera pas la solution la plus avisée.

L'une des conclusions qui ressort néanmoins de l'évaluation scientifique, technologique et économique exposée dans le présent rapport est qu'une orientation générale en faveur des approches biotechnologiques est également souhaitable du point de vue du public. Cette orientation découle non seulement des innovations techniques contemporaines, mais aussi de la nécessité d'économiser l'énergie et les matières et de réduire la pollution de l'environnement. Elle pourrait en fait s'attirer plus de suffrages du public que des changements industriels équivalents survenus dans le passé.

Les exemples de la Californie et du Royaume-Uni, qui ont déjà pu apprécier le poids de l'opinion publique derrière la demande pour l'essence sans plomb et d'autres carburants plus acceptables du point de vue de l'environnement, illustrent l'influence que peut avoir le climat de l'opinion sur l'usage de la technologie par la société. En prenant de plus en plus conscience de l'existence de différentes voies possibles de développement industriel, le public pourrait appuyer l'introduction de nombreux autres produits et procédés moins polluants.

ATTITUDES DU PUBLIC VIS-A-VIS DE LA BIOTECHNOLOGIE

La perception de la biotechnologie, comme n'importe quelle autre technologie, est influencée (quelquefois très fortement) par les informations diffusées à travers les médias et par d'autres canaux. Le fait que le public soit informé, ou mal informé, des liens complexes qui existent entre la technologie, la réglementation et l'action politique, a donc une incidence déterminante sur l'acceptation ou le rejet des nouvelles avancées techniques. Plus que jamais auparavant, ces innovations ne peuvent avoir un avenir que si les scientifiques et les responsables de la réglementation jouissent de la confiance du public. Les hommes politiques, qui établissent les programmes, les lignes directrices et les lois définissant le cadre d'action des responsables de la réglementation, sont fortement influencés par le débat et l'opinion publics, et notamment par la façon dont ils sont exposés dans les médias.

La biotechnologie mise au service de l'élaboration de procédés industriels sans risques pour l'environnement peut présenter un attrait pour les jeunes du monde entier, qui se sentent aujourd'hui très concernés par tout ce qui touche à l'environnement et aux régions défavorisées du globe. Comme nous l'indiquons plus loin, il apparaît également que la biotechnologie suscite plus de confiance que ce que laissent supposer les efforts de ceux qui s'y opposent.

La perception par le public de la biotechnologie appliquée aux procédés industriels moins polluants est mal connue et n'a pas fait l'objet de mesures quantitatives spécifiques. On ne peut faire par conséquent qu'extrapoler les résultats de sondages pour en déduire les attitudes du public vis-à-vis de la biotechnologie en général. Par exemple, une enquête menée récemment auprès des habitants du New-Jersey (Hallman, 1996) a révélé que plus de deux tiers d'entre eux pensaient que le génie génétique améliorerait la qualité de la vie. Un sondage réalisé en 1991 dans le cadre de l'«Eurobaromètre» sur un échantillon de 13 000 citoyens de l'Union européenne (International Research Associates, 1991) a montré que pour plus de trois personnes sur quatre, «la science et la technologie améliorent notre santé, et nous rendent la vie plus facile et plus confortable». Seulement 8 pour cent des personnes interrogées désapprouvaient cette affirmation. A l'exception des applications mettant en jeu des animaux d'élevage, les utilisations spécifiques de la biotechnologie remportaient un soutien massif.

Un pourcentage élevé, 87 pour cent, des personnes interrogées étaient favorables à la recherche sur «les micro-organismes utilisés pour décomposer les particules en suspension dans les eaux usées et d'autres déchets et les convertir en substances inoffensives dans le sol». Des observations très proches ont été recueillies au Japon (Macer, 1992) sur l'acceptabilité générale du génie génétique et sur son application à l'amélioration de l'environnement.

Le dernier sondage Eurobaromètre sur diverses technologies, conduit en 1996, couvrait un échantillon de quelque 16 000 personnes (1 000 en moyenne par pays). Bien qu'il ne soit pas particulièrement axé sur les attitudes du public à l'égard des questions environnementales, ce rapport (International Research Associates, 1997) indiquait dans sa conclusion que les Européens sont généralement optimistes à l'égard des progrès de la biotechnologie moderne. Les auteurs faisaient cependant remarquer qu'il ne s'agissait pas d'un optimisme aveugle : «S'ils soulignent les avantages de certains domaines de recherche, ils n'en signalent pas moins les risques potentiels.»

Les contrastes apparaissant entre ce rapport et un compte rendu des mêmes données réalisé par un groupe étroitement associé aux auteurs de l'Eurobaromètre (European Public Concerted Action Group, 1997) appellent aussi à la prudence dans le traitement des résultats de ce genre d'enquête. Les conclusions de ce groupe, selon lesquelles «de nombreux Européens se méfient de la biotechnologie moderne, notamment des nouvelles technologies génétiques», allaient à l'encontre de l'optimisme prudent émanant du rapport d'International Research Associates. De surcroît, tandis que les seconds affirment que les résultats étaient très proches de ceux du sondage Eurobaromètre conduit en 1991, les premiers concluent que l'optimisme à propos de la contribution de la biotechnologie a décliné au cours de ces cinq années.

L'Eurobaromètre de 1996 indique également que pour 80 pour cent environ des Européens, des applications telles que la production de médicaments et la mise au point de tests génétiques pour dépister des maladies seront utiles pour la société, 69 pour cent des personnes sondées considèrent comme profitable l'introduction de gènes de résistance aux parasites dans des plantes cultivées, tandis que 54 pour cent seulement voient un avantage à l'utilisation de la biotechnologie moderne dans la production alimentaire.

Les participants se sont montrés généralement les plus optimistes à propos des télécommunications, des technologies de l'information, de l'énergie solaire et des nouveaux matériaux. Moins de personnes s'attendaient à ce que la biotechnologie, l'exploration de l'espace et le génie génétique procurent des avantages. Ce qui ne signifie pas néanmoins qu'ils étaient pessimistes à cet égard. Une grande partie des personnes interrogées se sont déclarées sans opinion.

NIVEAU DE CONNAISSANCES ET ATTITUDE

Le pourcentage d'opinions favorables à la biotechnologie moderne augmente avec le revenu, le niveau d'éducation et la connaissance objective du sujet (cette constatation s'est aussi vérifiée à travers les questionnaires Eurobaromètre). La proportion d'optimistes est montée jusqu'à 67 pour cent chez les sondés ayant répondu correctement aux dix questions factuelles, contre 17 pour cent seulement chez ceux qui ont donné des réponses fausses aux dix questions. Les réponses du type «je ne sais pas» diminuaient sensiblement avec l'accroissement du niveau de connaissances.

L'acceptabilité morale de diverses utilisations de la biotechnologie a suscité de fortes réactions. La majorité des participants jugeaient moralement acceptables les tests génétiques destinés au dépistage des maladies (74 pour cent) et la fabrication de médicaments et de vaccins à l'aide du génie génétique (70 pour cent), mais seule une minorité (40 pour cent) s'est montrée favorable au développement d'animaux génétiquement modifiés pour les recherches en laboratoire et à l'utilisation du génie génétique pour produire des organes en vue de leur transplantation à l'homme (36 pour cent).

L'analyse de régression multiple a démontré que si l'application d'une biotechnologie donnée et son acceptabilité morale permettaient de prédire avec un grand degré de certitude l'appui dont elle bénéficierait, le risque proprement dit n'autorisait pas de prévisions fiables. Cela révèle probablement une discordance entre le souci habituel des responsables de la réglementation pour les risques et la sécurité et celui du public, qui s'articule maintenant autour de l'acceptabilité morale (European Public Concerted Action Group, 1997).

Ces données et les résultats d'autres sondages n'étaient pas l'idée, assez répandue, selon laquelle le public est fortement opposé à la biotechnologie et/ou au génie génétique. Pas plus qu'ils n'attestent une large adhésion. Ils suggèrent cependant qu'il est simpliste et trompeur de mesurer la température de l'opinion publique selon une seule échelle de valeurs allant de l'enthousiasme à

l'hostilité. L'un des résultats les plus instructifs du sondage Eurobaromètre de 1993 (International Research Associates, 1993) a été la constatation que parmi tous les pays étudiés, le Danemark était à la fois le plus favorable à la biotechnologie et le plus conscient des risques. En d'autres termes, il est possible d'avoir à la fois une très bonne opinion des progrès de la science dans des domaines tels que la médecine, l'agriculture et l'amélioration de l'environnement, et de se préoccuper des retombées néfastes potentielles des nouvelles technologies.

Evans et Durant (1995) ont livré des informations supplémentaires à travers l'enquête qu'ils ont conduite en Grande-Bretagne pour mesurer les attitudes générales de la population, en posant neuf questions telles que «peut-on faire confiance aux scientifiques?» ou «la science est-elle en train d'entraîner des changements trop rapides dans nos vies?». Les résultats ont montré que la science jouissait généralement d'une opinion favorable : 70 pour cent des personnes interrogées estimaient que la science et la technologie amélioreraient notre santé et notre confort et 80 pour cent approuvaient le soutien des pouvoirs publics à «la recherche qui élargit le champ de la connaissance». Le tableau n'était cependant pas uniforme, certains sondés souscrivant à la fois à des affirmations positives et négatives.

Pour savoir si l'opinion des sondés à propos de domaines particuliers de la recherche correspondait à leur opinion générale sur la science, Evans et Durant ont eu recours à d'autres séries de questions. Ces questions portaient, par exemple, sur la création de nouvelles formes de vie animale ou sur la découverte d'un traitement pour le cancer. Ici les corrélations étaient, au mieux, modérées : les corrélations les plus fortes ont été observées pour les sciences utiles et fondamentales, et les plus faibles pour les recherches sujettes à un débat éthique. Autrement dit, les réponses des participants aux questions concernant leur attitude générale face à la science et à la technologie ne permettaient pas de prévoir avec précision quel serait leur opinion sur tel ou tel sujet de recherche particulier.

Une troisième analyse a comparé les attitudes des sondés à l'égard de la science à leurs connaissances factuelles, évaluées d'après leurs réactions à diverses affirmations concernant les sciences naturelles et médicales. Evans et Durant ont découvert que s'il existait une corrélation significative entre l'attitude et les connaissances, son intensité variait considérablement. Ils ont noté une corrélation relative entre les connaissances factuelles des participants et leurs attitudes à l'égard de la science en général et de la recherche utile et fondamentale en particulier. En revanche, la corrélation était pratiquement nulle entre les connaissances et les attitudes envers la recherche considérée comme non utile. De surcroît, une forte corrélation *négative* est apparue entre la connaissance et le soutien à la recherche susceptible d'être considérée comme moralement discutable.

RÉGLEMENTATIONS ET ORGANISATIONS NON GOUVERNEMENTALES

Sur les six secteurs industriels examinés dans le présent rapport (voir le deuxième chapitre), le secteur alimentaire s'est trouvé confronté dans certains pays au problème de l'acceptation par le public des aliments élaborés à l'aide d'organismes recombinés. Le présent rapport n'a pas pour objet de traiter la question des aliments génétiquement modifiés, mais celle des technologies de transformation des aliments moins polluantes, susceptibles d'utiliser des méthodes dérivées du génie génétique, mais il n'est pas exclu que certaines personnes puissent réagir aux technologies de transformation moins polluantes faisant appel au génie génétique comme elles le feraient vis-à-vis des aliments génétiquement modifiés.

Pour de nombreuses personnes, l'essentiel n'est pas la connaissance ou la compréhension des aspects techniques, mais la confiance dans le système réglementaire, comme c'est le cas pour la sécurité des transports aériens, par exemple. Il est en effet vraisemblable que la confiance du public ne sera jamais gagnée uniquement par la fourniture d'informations. Des facteurs tels que la transparence de la prise de décisions au sujet des nouvelles technologies, l'évaluation des risques, ou la réglementation et le suivi de la recherche et de ses applications pratiques revêtent autant d'importance.

La réglementation et la législation visant la biotechnologie peuvent refléter ou anticiper les préoccupations réelles ou perçues du public. Il existe une interaction constante, à travers les rouages de la politique, entre les attitudes du public et la réglementation de la biotechnologie.

L'étiquetage des produits alimentaires est un sujet de préoccupation important pour le public, et qui reste à traiter. Dans la plupart des cas, la démarche est la même que pour la sécurité : un étiquetage spécial n'est demandé qu'à partir du moment où le produit d'une manipulation génétique s'écarte sensiblement du produit traditionnel auquel il ressemble.

Un certain nombre d'organisations non gouvernementales (ONG) influent sur l'action des pouvoirs publics en ce qui concerne l'utilisation des organismes recombinés. La plupart d'entre elles se préoccupent avant tout des applications médicales et agricoles faisant appel à des plantes et des animaux, mais leurs activités ont aussi une incidence sur les opérations de transformation de denrées alimentaires consistant à introduire des micro-organismes dans les produits. En dehors de l'OCDE, l'Organisation pour l'alimentation et l'agriculture (FAO) et l'Organisation mondiale de la santé (OMS) se sont également penchées sur les problèmes de sécurité liées aux biotechnologies alimentaires, en menant des consultations d'experts conjointes en 1990 et en 1996. Le rapport FAO/OMS le plus récent présente un aperçu général des problèmes liés à la sécurité des aliments, mais n'aborde pas la question des aspects environnementaux, des résidus occasionnels des adjuvants de transformations alimentaires ou de l'étiquetage (FAO, 1996).

Plusieurs organisations appuyées par l'industrie défendent activement la biotechnologie alimentaire. La *Biotechnology Industry Organization* est un groupe de pression installé aux États-Unis, qui possède une section dévolue à l'alimentation et à l'agriculture. L'*International Food Information Council*, également situé aux États-Unis, est une fondation sans but lucratif qui fournit des programmes éducatifs sur les avantages de la biotechnologie alimentaire. L'ETA (*Enzyme Technical Association*) regroupe des entreprises fabricant des enzymes aux États-Unis, dont les activités consistent notamment à dialoguer avec les autorités américaines au sujet de la sécurité des enzymes alimentaires issues d'organismes recombinés. L'*Association of Microbial Food Enzyme Producers* représente des fabricants d'enzymes implantés en Europe et mène des activités analogues à celles de l'ETA.

Par ailleurs, plusieurs organismes de défense des consommateurs militent contre certains aspects des biotechnologies alimentaires. Le *Council for Responsible Genetics* et la *Foundation for Economic Trends* sont deux de ces organismes, nombreux aux États-Unis, tandis que Greenpeace et le Réseau international des amis de la Terre sont particulièrement actifs en Europe. La plupart de ces groupes se consacrent plus spécialement aux questions liées aux plantes, aux animaux et à l'agriculture, mais la section allemande des Amis de la Terre s'est penchée spécifiquement sur les enzymes issues d'une recombinaison utilisées comme adjuvants des transformations alimentaires.

D'autres groupes tentent d'adopter une position neutre. En 1990, l'*International Food Biotechnology Council* a fait appel à des experts indépendants, financés néanmoins par l'industrie, pour préparer un rapport sur les critères scientifiques de la sécurité des aliments issus d'une recombinaison. Le *National Center for Genome Resources* est un organisme sans but lucratif installé aux États-Unis, qui finance un programme éducatif sur la génétique et les questions d'intérêt public, qui couvre ces aliments. *SustainAbility* est un groupe situé à Londres qui se charge de vérifier en toute indépendance les revendications des entreprises à propos de leurs performances environnementales.

VARIATIONS ENTRE PAYS

Le sondage Eurobaromètre de 1996 (International Research Associates, 1997) a révélé une variation considérable des attitudes selon les pays. Tandis que 57 pour cent des Italiens et 56 pour cent des Espagnols considéreraient que la biotechnologie et le génie génétique amélioreraient la qualité de la vie durant les 20 prochaines années, 28 pour cent seulement des Autrichiens et 36 pour cent des Allemands ont exprimé la même confiance. Des changements d'attitude similaires se sont produits au cours des ans. Par exemple, aux Pays-Bas, l'optimisme à l'égard de la biotechnologie a fléchi entre 1991 et 1993, mais est revenu en 1996 au niveau de 1991. D'autre part, l'optimisme a poursuivi son déclin en Grèce durant la même période.

Le niveau de connaissance de la biotechnologie parmi les consommateurs varie considérablement d'un pays à l'autre. C'est en Allemagne, en Autriche, au Danemark et au Japon qu'il semble le plus élevé et, en Espagne, en Grèce et en Italie qu'il est le plus bas. Celui des habitants des États-Unis et du Canada est intermédiaire, et il a quelque peu régressé aux États-Unis entre 1992 et 1996 (Hoban, 1997).

L'acceptation par le consommateur de la biotechnologie appliquée aux aliments varie aussi, mais cette variation obéit à des caractéristiques différentes. En ce qui concerne le marché des États-Unis, le plus étudié, plusieurs sondages montrent qu'entre deux tiers et trois quarts des consommateurs sont favorables à la biotechnologie et prêts à accepter son utilisation dans la fabrication des aliments. L'Australie, le Canada, le Japon et la Nouvelle-Zélande ont fait part de résultats semblables. En Europe, cependant, moins d'un tiers des consommateurs autrichiens et allemands étaient prêts à accepter des produits alimentaires issus de la biotechnologie végétale. Aux Pays-Bas et au Portugal, le comportement des consommateurs s'aligne sur celui observé aux États-Unis, tandis que dans les autres pays européens, il se situe quelque part entre les deux (Macer, 1992; Hoban, 1996b,1997; Decima Research, 1996).

Les consommateurs semblent fonder leur acceptation sur leur perception du risque ou de l'avantage. A titre d'exemple, les manipulations génétiques sont jugées plus dangereuses lorsqu'elles sont pratiquées sur des animaux que sur des plantes, et les applications médicales sont perçues comme plus bénéfiques que les aliments issus d'une recombinaison. Des enquêtes réalisées aux États-Unis en 1992 et en 1994 ont montré que l'emploi de la biotechnologie pour la fabrication des médicaments et la protection des cultures contre les attaques d'insectes était le plus acceptable, tandis que son utilisation pour augmenter le poids des poissons recherchés par les pêcheurs à la ligne et fabriquer des ingrédients alimentaires attirait le moins de soutien. Un nombre à peu près équivalent de sondés a estimé que les ingrédients confectionnés à l'aide de la biotechnologie étaient acceptables, inacceptables et neutres (Hoban, 1996b).

Un sondage effectué en 1995 auprès des consommateurs japonais a donné des résultats analogues. Les « plantes cultivées diminuant la quantité de pesticides nécessaires » et « l'insuline humaine ou d'autres médicaments » étaient les plus acceptables, tandis que « les poissons plus gros et à croissance plus rapide » ainsi que « les ingrédients alimentaires tels que les arômes » étaient les moins acceptables. Les « enzymes employées dans la production des aliments » occupaient une position intermédiaire, quelque 40 pour cent des personnes interrogées les jugeant acceptables, 20 pour cent inacceptables et 40 pour cent neutres (Hoban, 1996a).

C'est à propos de l'étiquetage que les résultats des sondages sont les plus homogènes. Indépendamment de leur niveau de connaissances ou de leur degré d'acceptation, les consommateurs de nombreux pays veulent rendre obligatoire l'étiquetage des aliments issus d'une recombinaison génétique. Une enquête régionale menée aux États-Unis offre des résultats typiques à cet égard : 85 pour cent des consommateurs étaient à l'époque favorables à l'étiquetage obligatoire, même si 58 pour cent seulement d'entre eux ont déclaré qu'ils liraient l'information sur l'étiquette ou s'en serviraient pour décider d'acheter ou non le produit (Hallman et Metcalfe, 1993). Le souhait relatif à l'étiquetage peut être le fait d'un manque d'information sur la nature des organismes recombinés. Au Canada, par exemple, les associations de consommateurs et les associations professionnelles locales de détaillants alimentaires, qui étaient initialement favorables à l'étiquetage, ne considèrent plus l'étiquetage obligatoire comme la meilleure solution.

ATTITUDES A L'ÉGARD DE L'ENVIRONNEMENT

Très peu d'enquêtes ont été spécifiquement consacrées à l'opinion de la population à l'égard des aspects environnementaux de la biotechnologie. Une étude préliminaire conduite au Canada en 1996 portait exclusivement sur les applications environnementales. Elle avait pour objet d'évaluer le comportement des Canadiens à travers une série de cinq groupes de discussion organisés à travers le pays. Après avoir reçu une brève explication au sujet de certaines applications environnementales de la biotechnologie, les participants se sont montrés généralement favorables à ces dernières, notamment lorsqu'elles pouvaient avoir un lien avec des technologies qui leur étaient familières, comme le compostage et la production de biocombustibles. Les participants approuvaient aussi les applications de la biotechnologie tant qu'ils étaient tenus au courant de leurs avantages et de leurs risques. Plus précisément, le soutien apporté à diverses applications environnementales se chiffrait à 75 pour cent pour l'utilisation des biocapteurs, à 79 pour cent pour la production de spécialités chimiques et à

86 pour cent dans le cas des biocombustibles. Les applications de la biotechnologie visant l'environnement et la santé étaient jugées plus prioritaires que celles visant la production alimentaire (McIntyre, 1996).

Une autre étude couvrait différentes applications potentielles du génie génétique (Martin et Tait, 1992). Elle visait à apprécier les attitudes d'un échantillon de la population du Royaume-Uni composé de personnes choisies au hasard sur les listes électorales et habitant dans deux parties du pays où des organismes recombinés avaient été disséminés, de membres des Amis de la Terre et d'autres groupes de pression écologistes, ainsi que de membres du personnel non technique d'entreprises travaillant dans le secteur de la biotechnologie.

Même dans un échantillon de cette composition, l'appui à l'utilisation des manipulations génétiques à des fins de décontamination de l'environnement était aussi fort que pour leur application à la médecine. Quelque 65 pour cent des sondés « n'étaient pas gênés » par l'idée d'employer des organismes recombinés pour nettoyer les nappes d'hydrocarbures et détoxifier des déchets industriels. Ce chiffre descendait à 59 pour cent dans le cas de la recherche médicale et à 57 pour cent pour la « confection de médicaments ».

Martin et Tait ont attiré l'attention sur l'étonnante diversité des opinions qui se reflétait dans ces pourcentages globaux, lorsqu'ils ont décomposé leur échantillon en ses groupes constitutifs. Même sur des questions comme l'amélioration du rendement des cultures et la fabrication de médicaments, qui ne sont généralement pas considérées comme sujettes à controverse, une grande variation a été observée dans les réponses. Toutefois, l'éventail des opinions parmi les personnes qui « n'étaient pas gênées » par l'idée d'avoir recours aux manipulations génétiques pour les deux types de décontamination de l'environnement était l'un des plus étroits.

Un autre type de réactions émane de la partie de l'Europe qui est très opposée à la technologie génique, à savoir l'ex-RDA. Cette opposition a reculé au cours des cinq à dix dernières années, ce que Radkau (1995) attribue en partie aux changements qui ont suivi la réunification de l'Allemagne. Non seulement les grands problèmes économiques et sociaux associés à la réunification ont détourné l'attention des dangers supposés de la technologie génique, mais la dénonciation de ces dangers est brusquement passée à l'arrière-plan par suite de la prise de conscience de l'ampleur de la pollution industrielle en Allemagne de l'Est et dans d'autres pays d'Europe orientale.

VIABILITÉ ÉCOLOGIQUE ET ÉTAT D'ESPRIT DU PUBLIC

Les définitions et les objectifs de la viabilité écologique ont été exposés au premier chapitre. Il y a une trentaine d'années, Ward (1966) avait déjà repris l'analogie de Buckminster Fuller pour déclarer que :

... la manière la plus rationnelle de concevoir l'ensemble de la race humaine aujourd'hui est de la considérer comme l'équipage d'un unique vaisseau spatial sur lequel chacun d'entre nous, dans des conditions caractérisées par une combinaison remarquable de sécurité et de vulnérabilité, accomplit son pèlerinage à travers l'infini.... Ce voyage spatial est totalement précaire. Nous dépendons d'une mince enveloppe de sol et d'une couche d'atmosphère sensiblement plus épaisse. Et les deux peuvent être contaminées et détruites.

Les préoccupations relatives à la pollution et à la protection de la nature, qui ont vu le jour durant les années 60 et 70, ont donné lieu à des mesures d'amélioration isolées. Cependant, l'émergence ultérieure de la biotechnologie moderne offre la possibilité d'imprimer un changement plus profond à la relation entre l'industrie et l'environnement. Comme l'a fait valoir Speth (1992), la perspective d'une transition vers une viabilité écologique beaucoup plus grande peut être considérée comme un défi à la fois technique et moral. Dans les pays développés, elle pourrait transformer radicalement les tensions entre la responsabilité en matière d'environnement et la compétitivité commerciale. Dans les pays moins développés, elle est susceptible d'atténuer considérablement les tensions entre la responsabilité en matière d'environnement et le développement économique.

Cette ouverture est née de la coïncidence entre, d'une part, les progrès récents et les perspectives futures des biosciences appliquées et, d'autre part, l'apparition possible au sein de la population d'un état d'esprit réceptif à l'application d'un type de technologie plus compatible avec la nature que les

technologies du passé. Au cours des années, il est arrivé à de nombreuses reprises que l'« offre » de l'innovation technique ne réponde pas à la « demande » des besoins de la société. L'apparition des technologies propres marque peut-être la première occasion où ces deux forces sont en harmonie.

Toutefois, quelle que soit la solidité des arguments à cet égard, on ne parviendra pas à changer de cap sans recourir à des mesures vigoureuses pour informer le public de la nature réelle de la biotechnologie et pour motiver les faiseurs d'opinion et les autres acteurs principaux. L'amélioration de la compréhension mutuelle et de la coopération entre les dirigeants d'entreprises et les défenseurs de l'environnement constitue une nécessité particulièrement pressante. L'émergence d'une nouvelle génération de technologies respectueuses de l'environnement passera par leur accord sur un programme commun.

Speth (1992) définit celui-ci comme un programme « qui ne considère pas seulement la technologie comme une partie du problème, mais aussi comme une partie de la solution ». Un tel programme couvrirait de nombreuses questions très diverses telles que le besoin de remplacer les machines et l'équipement par des versions plus acceptables du point de vue de l'environnement, et la nécessité pour les chefs d'entreprise de s'écarter des attitudes hostiles pour adopter une approche nouvelle, concertée et écologiquement viable à l'égard de la production industrielle.

FAVORISER LA COMPRÉHENSION DE LA BIOTECHNOLOGIE PAR LE PUBLIC

L'expérience acquise dans des domaines aussi divers que l'enseignement scolaire, la publicité et les campagnes politiques tend à montrer qu'il n'existe pas de stratégie universelle permettant de développer la compréhension d'un sujet tel que la biotechnologie. Les actions entreprises devront tenir compte de la nature des sociétés dans lesquelles ces initiatives verront le jour. Dans l'ensemble, les données détenues par les pays de l'OCDE indiquent que si l'intérêt du public à l'égard de la science et de la technologie est élevé, son *niveau de connaissances* est nettement plus faible que cet intérêt ne le laisserait supposer (OCDE, 1996 ; Normile, 1996).

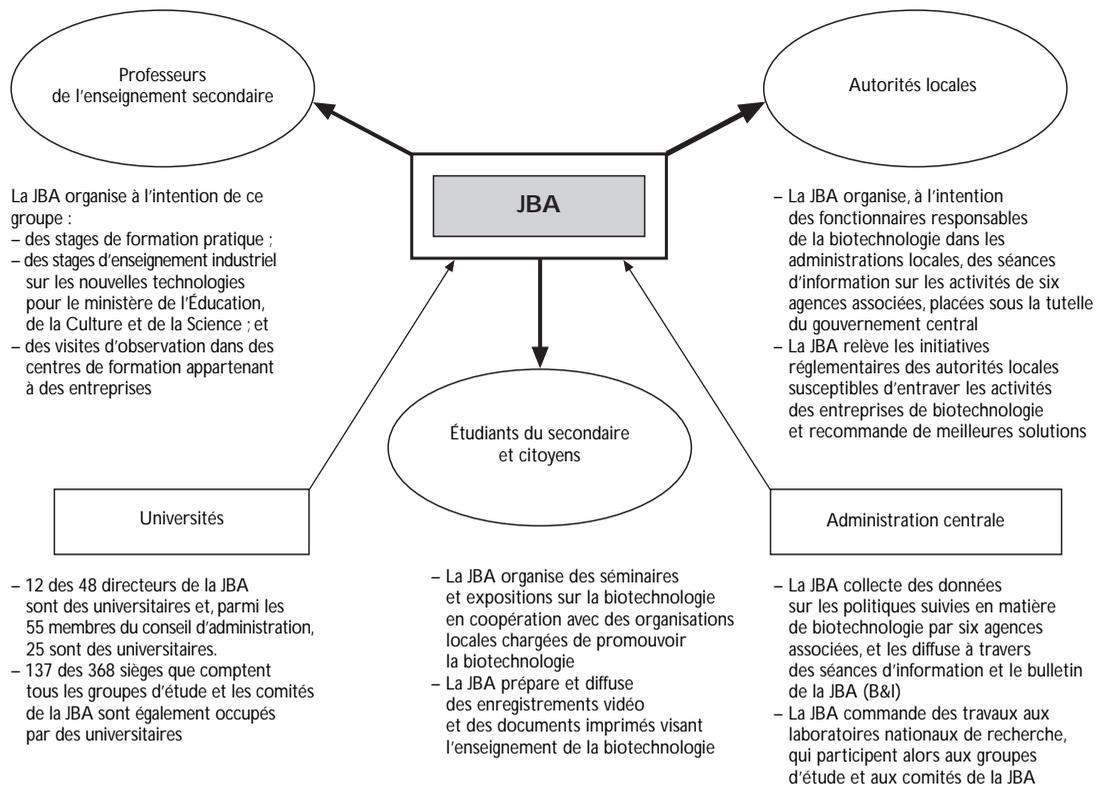
En outre, ces deux aspects accusent d'importantes disparités suivant les pays. Même à l'intérieur de l'Europe continentale, des démarches susceptibles d'être fructueuses dans des pays comme la France ou l'Italie, par exemple, risquent de ne pas donner les mêmes résultats dans les contextes différents de l'Allemagne, de l'Autriche ou de la Suisse. Il n'en reste pas moins que dans tous ces pays, ces initiatives devront s'efforcer d'aider les citoyens à comprendre l'évolution des biotechnologies et leurs implications, et d'encourager les citoyens à peser sur l'application de ces technologies, s'ils le souhaitent, en exerçant leurs droits politiques ou par d'autres biais.

Un aspect particulier devra être abordé, celui des nombreux rôles positifs que les micro-organismes peuvent jouer dans la nature, autres que celui d'agents de maladies des animaux et des végétaux. Ainsi qu'Atlas (1996) l'a remarqué, les micro-organismes sont fréquemment perçus comme des agents pathogènes, alors que l'on néglige les populations, bien plus importantes, de micro-organismes bénéfiques, qui sont en fait indispensables à la vie sur Terre.

Le champ des initiatives possibles pour promouvoir une meilleure connaissance de la diversité des activités accomplies par les micro-organismes est très vaste. Certains projets remplissent déjà cette mission, comme le *Microcosmos Science Education Museum* de l'Université de Boston ou le partenariat *Microbial Literacy Collaborative* de l'American Society for Microbiology à Washington, DC, aux États-Unis, tandis qu'au Japon, l'Association japonaise des bio-industries conduit aussi de tels projets (figure 5.1). A côté des moyens employés de longue date pour communiquer avec le public, les expositions itinérantes, les foires et les semaines scientifiques (qui ont fleuri ces dernières années) pourraient être mises à profit pour faire mieux connaître les fonctions bénéfiques des micro-organismes (OCDE, 1997a).

Atlas (1996) considère qu'il est essentiel, pour que le public accepte la biodépollution, par exemple, de modifier l'image actuelle, largement négative, des micro-organismes au moyen de programmes éducatifs visant à développer la culture scientifique. Toutefois, une reconnaissance accrue de l'étendue des activités microbiologiques bénéfiques à l'environnement et à l'humanité est aussi de nature à encourager l'appui en faveur de l'exploitation des micro-organismes, et des agents biologiques en général, dans d'autres domaines, comme les technologies industrielles non polluantes.

◆ Figure 5.1. *Activités menées par l'Association japonaise des bio-industries (JBA) afin d'améliorer l'acceptation des biotechnologies par le public*



Source : JBA.

Si les informations citées précédemment tendent à indiquer que, dans de nombreux pays, le public est plus favorable à la biotechnologie que ne le laisseraient supposer les médias et les activités des groupes de pression, il est faux de croire que si le public connaît mieux une technologie, il sera automatiquement porté à mieux l'accepter. L'inverse pourrait aussi se produire.

INTÉRÊT CROISSANT POUR LA PROTECTION DE LA NATURE

Un trait particulier du monde contemporain est susceptible de favoriser le soutien du public aux technologies propres : l'intérêt croissant dans de nombreux pays du monde pour la sauvegarde et la protection du milieu naturel. Comme Lynch et Hutchinson (1993) l'ont fait remarquer, l'incorporation de thèmes environnementaux à tous les niveaux de l'enseignement aux États-Unis a accompagné, et en partie inspiré, cette révolution dans les attitudes du public.

Les programmes de l'école élémentaire, par exemple, couvrent désormais des sujets tels que le recyclage et les sources d'énergie renouvelables. Au niveau de l'enseignement secondaire, l'étude de ces sujets est approfondie et élargie afin d'inclure des notions telles que la bonne gestion de la planète ou la citoyenneté environnementale. De même, les études sur l'environnement sont en train de s'intégrer rapidement aux programmes universitaires scientifiques et de culture générale, tandis que les disciplines de base, à savoir la biologie, la physique, la chimie, les sciences de l'ingénieur et la géologie, sont complétées par des références à l'environnement.

De toute évidence, les initiatives de ce type sont loin d'être universellement répandues. Il est urgent de les consolider et de les développer, et d'incorporer ces messages dans les programmes scolaires et dans ceux de l'enseignement supérieur de tous les pays, quel que soit leur niveau de développement économique.

Lynch et Hutchinson (1992) font valoir que la question fondamentale de l'écologie : « comment pourvoir aux besoins d'une population mondiale en croissance rapide et poursuivant (nécessairement) son industrialisation sans atteindre un point de non-retour malthusien » peut imprimer une orientation pour ces initiatives pédagogiques. L'orientation doit être suffisamment claire et crédible pour que le défi environnemental puisse être présenté comme le plus grand défi de notre temps et conquérir les cœurs et les esprits des étudiants.

Mais ce message peut aussi atteindre un public élargi, la société tout entière. Il pourrait induire un climat propice à l'adoption de technologies qui, comme nous l'avons illustré dans d'autres parties du présent rapport, revêtent deux caractéristiques remarquables. Elles sont intrinsèquement plus propres que d'autres technologies analogues, et offrent plus de possibilités pour concevoir et conduire les procédés selon des modalités compatibles avec l'environnement.

Faire plus largement connaître ces avantages exige des initiatives judicieuses et conçues avec doigté dans le domaine de l'information du public. Si la stratégie doit être conçue pays par pays afin de tenir compte des différences culturelles, éducatives et autres, ces tâches sont à mener dans un avenir immédiat pour que nous puissions récolter les fruits de la biotechnologie appliquée aux produits et procédés industriels propres.

ATTEINDRE DIFFÉRENTS PUBLICS

Les groupes visés en premier sont les faiseurs d'opinion (notamment les rédacteurs en chef des grands journaux et des magazines, et les réalisateurs des programmes de radio et de télévision); les élèves et leurs enseignants dans les écoles primaires et secondaires; les étudiants en sciences, en technologie et dans d'autres matières dans l'enseignement supérieur; le personnel non technique des entreprises de biotechnologie et d'autres secteurs; ainsi que les hommes politiques aux échelons local, national et supranational (par exemple européen). Les matériels concrets à utiliser dans chaque sphère seront déterminés en fonction de leur adéquation et des pratiques en vigueur. Par exemple, les vidéos et les CD-ROM sont de plus en plus appréciés dans les écoles, tandis que de nombreux hommes politiques préfèrent utiliser des documents d'information rédigés de façon concise.

L'argument qui consiste à viser les rédacteurs en chef de la presse, de la radiodiffusion et de la télévision en raison de leur influence en tant que faiseurs d'opinion est à double tranchant. Les journaux, les canaux de radiodiffusion et de télévision et les autres médias ont incontestablement un appétit sans cesse renouvelé pour les idées, les nouveautés et les sujets avec lesquels ils pensent intéresser leur public. Toutefois, ils peuvent aussi avoir une opinion négative sur les causes pour lesquelles leur soutien actif est recherché. Il existe une distinction subtile entre obtenir une grande couverture médiatique sur un sujet d'intérêt public et espérer que les journalistes jouent le rôle de porte-parole. Il est illusoire, et peut être frustrant et/ou contre-productif, de déployer des efforts pour obtenir ce genre de collaboration de la part des médias.

Il demeure toutefois de bonnes raisons de vouloir communiquer des informations et des idées aux rédacteurs en chef. Comme les rédacteurs en chef de la presse « filtrent les informations à l'entrée », ils jouent un rôle beaucoup plus important que la plupart des simples journalistes pour décider des sujets qui seront couverts par leurs publications, de l'importance accordée à ces sujets et du style de leur présentation. Avant tout, les rédacteurs en chef fixent les thèmes qu'ils traiteront régulièrement, non seulement dans les colonnes de nouvelles, mais aussi dans des articles de fond et sur des pages influentes telles que les éditoriaux. Des considérations de même nature s'appliquent à la radiodiffusion et à la télévision.

L'une des raisons, et non la moindre, pour laquelle les écoles représentent un autre secteur important est le grand intérêt porté par les jeunes à l'environnement. Ainsi que l'a suggéré l'OCDE (1995), l'approche pédagogique pourrait s'appuyer sur la notion de cycle de vie des produits, avec

laquelle les étudiants sont déjà familiarisés (voir également le quatrième chapitre sur l'analyse du cycle de vie). Pour les élèves de l'école primaire, par exemple, une chaussure en cuir pourrait être le point de départ de discussions sur l'élevage du bétail, l'industrie du tannage, la conception et l'assemblage des chaussures, leur distribution et leur élimination. Des technologies plus propres pourraient être comparées aux technologies classiques à chaque étape.

L'école est un lieu très indiqué pour propager ces idées. Une enquête menée par l'Université de Klagenfurt a montré que les écoles des pays du centre et du nord de l'Europe étaient de plus en plus «écologisées». En Autriche, entre 1992 et 1994, les douze établissements scolaires de Weiz ont fait l'objet d'un examen visant à analyser leur performances environnementales. Ces contrôles ont révélé des défaillances, telles que l'absence de dispositifs de régulation thermique dans les salles de classe (dépourvues de thermostats et de systèmes d'isolation) et des points forts, tels que l'utilisation de papier recyclé, le tri des déchets, la suppression des emballages en aluminium et en plastique et la culture de végétaux locaux sur les terrains des établissements scolaires (OCDE, 1997b).

S'agissant de la biotechnologie proprement dite, des efforts pour introduire le sujet dans des écoles de la zone de la baie de San Francisco (Californie) ont été largement couronnés de succès. Ces initiatives risquent cependant de tourner court rapidement si, par exemple, les enseignants responsables sont mutés ailleurs ou si le matériel obtenu au départ grâce à une aide financière n'est pas renouvelé. Mascarenhas (1997) insiste sur la nécessité pressante de soutenir ce type d'activités à long terme.

La salle de classe est un contexte où il est possible de forger des attitudes et des opinions durables, notamment si elles sont cautionnées par un enseignant respecté. Plusieurs pays ont constaté ce phénomène au cours de la dernière décennie, à la suite de visites effectuées dans les écoles par des défenseurs des droits de l'animal. Si ces visites ont leur légitimité, elles risquent de rendre les élèves très réfractaires aux arguments en faveur de la nécessité de pratiquer certaines expériences sur les animaux (en leur évitant au maximum de souffrir) au stade actuel des connaissances médicales.

ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET POLITIQUE

Dans l'enseignement supérieur, il est avant tout nécessaire d'élargir la formation des biotechnologistes et d'autres spécialistes. Des concepts tels que l'analyse du cycle de vie et la viabilité écologique doivent être totalement intégrés dans leur formation et, par suite, dans leur mode de pensée futur.

Ainsi que Troxell (1992) l'a observé, «Nous avons besoin de personnes capables de saisir diverses technologies dans leur globalité, de comprendre tout le fonctionnement d'un procédé industriel et de dégager les points forts et les points faibles de chaque composante d'un procédé industriel en vue de son optimisation totale.» Dans le passé, l'étendue des connaissances couvertes par une formation n'était souvent pas assez grande pour que les étudiants soient au fait de tous les aspects d'un procédé industriel. Il était fréquent, par exemple, qu'un ingénieur chimiste œuvrant à la mise au point d'un procédé ne soit pas tenu de prendre en considération l'impact de l'obtention des matières premières ni même, dans certains cas, les modalités de l'élimination des sous-produits. Ces aspects étaient habituellement confiés à d'autres spécialistes.

Des réorientations analogues s'imposent dans la formation du futur personnel non scientifique des industries et dans la rééducation professionnelle du personnel en place, à travers des stages de formation en cours d'emploi, par exemple. Certains changements à encourager, par exemple dans les modes de pensée du personnel chargé de responsabilités financières, pourront apparaître comme contraires aux obligations professionnelles qu'ils assumaient jusque-là. De surcroît, comme l'OCDE (1995) l'a fait remarquer, des chefs d'entreprise rationnels seront peu enclins à opter pour des technologies et des produits moins polluants s'ils n'améliorent pas la compétitivité de leur entreprise, et tant que les pouvoirs publics ne prendront pas d'initiatives pour favoriser la demande de ces produits.

Ehrenfeld (1994) préconise d'intégrer la notion d'«écologie industrielle», qui englobe la technologie propre, l'analyse du cycle de vie et les modes de fabrication respectueux de l'environnement, dans l'enseignement universitaire, sans limiter cette mesure aux seules disciplines scientifiques et

technologiques. Il constate que les enseignants commencent tout juste à reconnaître la nécessité d'éduquer les professionnels dans des domaines comme la gestion des entreprises, où l'environnement a été pratiquement ignoré dans le passé.

Les personnes exerçant ce genre de profession devront consacrer une bonne partie de leur temps à répondre aux exigences des autorités chargées de la réglementation. Il importe toutefois de faire saisir aux étudiants, durant leur formation, toute l'ampleur du contexte de la viabilité écologique de l'industrie, afin qu'ils soient capables d'anticiper et d'éviter les problèmes, plutôt que de les laisser se développer et d'avoir à trouver une solution après coup. Ehrenfeld soutient que les conséquences technologiques des activités de la société devraient être intégrées de façon plus explicite dans la formation des étudiants qui se destinent à des professions de planification, d'élaboration de stratégies, de gestion et de conception.

La *National Science Foundation* des États-Unis et la *Lucent Technologies Foundation* ont lancé en 1997 un programme ayant pour objet d'aider à former la prochaine génération de scientifiques et d'ingénieurs spécialisés dans des questions d'environnement. Dans tout le pays, des chercheurs ont reçu des subventions afin de développer l'écologie industrielle et d'encourager les entreprises à intégrer la prévention de la pollution dans leurs opérations quotidiennes. Chacune des 18 subventions accordées aidera une personne ou une équipe participant à des programmes de recherche ou d'enseignement à prêter son concours à l'industrie pour concevoir des procédés qui préviennent la pollution et créer des produits respectueux de l'environnement.

Une entreprise, au moins, a déjà déployé des efforts considérables pour évaluer ses propres activités du point de vue de l'environnement au sens large et pris une série d'initiatives en conséquence; il s'agit de l'entreprise danoise Novo Nordisk, implantée à Bagsvaerd au Danemark. Une description détaillée est fournie dans l'encadré 5.2.

Encadré 5.2. Procédure appliquée par une entreprise pour établir ses rapports sur l'État de l'environnement

En 1974, lorsque la première loi sur la protection de l'environnement est entrée en vigueur au Danemark, Novo Nordisk, un fabricant d'insuline et d'enzymes, a créé un service de l'environnement indépendant, chargé de veiller au respect des normes officielles. A la fin des années 80, toutefois, l'entreprise prenait de plus en plus conscience de la nécessité d'entretenir un dialogue avec ses clients, son voisinage, les organismes de défense de l'environnement, les étudiants, les investisseurs, les salariés et d'autres groupes.

Durant la période qui a précédé le Sommet de Rio en 1992 (voir aussi au sixième chapitre), la Chambre de Commerce internationale (CCI) a rédigé une Charte des entreprises pour le développement durable comportant 16 points, ce qui a permis aux entreprises de déclarer leur volonté de consigner, de contrôler et de communiquer leurs performances environnementales au public. Novo Nordisk, qui a signé la charte, s'en sert comme guide pour ses activités et sa ligne de conduite en matière d'environnement. L'entreprise a décidé de communiquer ouvertement, au niveau tant interne qu'externe, et publie un rapport annuel qui permet aux parties intéressées de suivre les progrès de l'entreprise dans le domaine de l'environnement. Dans ses rapports récents, Novo Nordisk a présenté des schémas détaillés de la consommation de ressources et de l'impact environnemental de toutes ses installations de production à travers le monde, et donné des informations sur la conformité de ses activités avec les législations de tous les pays.

Le Rapport environnemental joue un rôle important au niveau interne et sert aussi à informer des personnes extérieures à l'entreprise. Il motive le personnel en soulignant les objectifs se rapportant à l'environnement et les résultats des efforts accomplis, aide à déceler les problèmes nouveaux, et permet ainsi de catalyser l'amélioration des actions de Novo Nordisk en faveur de l'environnement. L'entreprise préconise un dialogue direct permettant de débattre des questions d'environnement, en particulier dans des domaines complexes comme la biotechnologie. Un grand nombre d'écoliers et d'étudiants visitent l'entreprise, et son personnel responsable de l'environnement participe régulièrement à des conférences et à des cours donnés à l'extérieur.

Étant donné que même la conception et l'évaluation de procédés industriels plus compatibles avec le respect de l'environnement prennent du temps, il faudra sans doute un bon nombre d'années pour que ces procédés soient adoptés. Bien que cette tendance puisse être accélérée (ou ralentie) par la pression publique et politique, elle risque de s'étendre au-delà des horizons jusqu'où les hommes politiques ont l'habitude de travailler. Néanmoins, des problèmes à long terme comme le réchauffement planétaire et la préservation de la diversité génétique figurent depuis quelques années à l'ordre du jour des débats politiques et reçoivent une grande attention aux niveaux national et international.

Ces évolutions infirment donc la critique souvent formulée à l'encontre des hommes politiques, qui veut que ces derniers se préoccupent uniquement de ce qui s'inscrit dans la durée, éventuellement très courte, de leur propre mandat politique. Elles laissent aussi à penser que les hommes politiques sont susceptibles d'être réceptifs à des documents d'information portant sur les technologies propres, un sujet qui réunit des préoccupations liées à l'environnement et aux ressources à l'échelle mondiale, et des questions ayant trait à la finance et aux entreprises, en particulier lorsque ces thèmes sont soulevés par leur électorat. De toute évidence, il y a lieu de développer les connaissances scientifiques des responsables de la réglementation et des citoyens à propos de la biotechnologie au service de procédés et de produits industriels propres.

LE FACTEUR TEMPS

Les efforts destinés à faire mieux comprendre la biotechnologie au public doivent tenir compte des différents états d'esprit de la population et de la manière dont l'opinion publique se forme dans les différents pays. Un article de revue récent (*Nature*, 1997) a montré qu'il existe des différences entre les États-Unis, la Russie, le Japon, l'Allemagne, la France et le Royaume-Uni quant à l'intérêt du public pour les nouvelles technologies et au développement de la bioéthique en tant que discipline. Toutefois, comme le laissent supposer les résultats de l'Eurobaromètre de 1996, la justification morale (ou son absence) semble susciter en général un intérêt croissant dans certains domaines de recherche et de développement.

Les travaux ayant trait à la perception de la biotechnologie doivent aussi tenir compte du caractère plutôt dynamique de l'opinion publique. Outre les résultats de l'Eurobaromètre de 1996 cités plus haut, trois événements récents illustrent de façon frappante cette constatation. Premièrement, un sondage d'opinion réalisé en 1996 à Allensbach, en Allemagne, a révélé que sur un échantillon de 1 000 personnes, 29 pour cent seulement pensaient que le génie génétique comportait des risques tels qu'il devrait être interdit (Abbott, 1997). Huit ans auparavant, un sondage identique avait donné une proportion de 40 pour cent.

Deuxièmement, un sondage d'opinion mené en Autriche en 1994 (Torgersen et Seifert, 1997) indiquait que si le pourcentage d'opinions favorables au génie génétique était inférieur à celui observé dans d'autres parties de l'Europe, la perception du risque y était aussi relativement faible. Le facteur déterminant semblait être une attitude réservée à l'égard des technologies nouvelles en général, plutôt qu'une idée concrète des dangers possibles. Cependant, en 1996, le premier projet de dissémination d'organismes recombinés en Autriche a suscité un rejet massif et une inquiétude grandissante au sujet des risques associés.

Troisièmement, un observateur averti des questions scientifiques au Japon a fait observer (Swinbanks, 1997) que si les scientifiques «sont généralement bien considérés au Japon, et si le public accepte dans l'ensemble leur avis sans le critiquer ... la confiance qu'ils inspirent a été considérablement érodée par les événements de l'année dernière». Un scandale déclenché par la contamination du sang et de produits sanguins par le virus HIV, et un incident au cours duquel des milliers d'écoliers ont souffert d'une grave intoxication alimentaire provoquée par la souche pathogène O157 d'*Escherichia coli*, ont eu un retentissement particulier.

Des événements survenus au Royaume-Uni en 1996, notamment une épidémie de *E. coli* O157 et l'apparition chez des êtres humains de cas de la maladie de Creutzfeld-Jacob, supposée être associée à l'encéphalopathie spongiforme bovine, ont montré comment des inquiétudes particulières peuvent

accroître le malaise général à propos de la science et des scientifiques. Ils sont susceptibles, comme dans ce cas, de réveiller ou de renforcer des inquiétudes au sujet de la biotechnologie, en dépit du fait qu'aucun de ces deux incidents n'ait un lien avec la biotechnologie. L'intensification ou l'apaisement de ces inquiétudes ne dépend pas uniquement des faits matériels mais aussi de la nature des initiatives menées pour améliorer la compréhension de la biotechnologie par le public, et des mesures prises pour expliquer ce qui s'est passé lorsque des événements malheureux se produisent.

Des sondages d'opinion tels que ceux cités ci-dessus montrent que dans de nombreux pays, une bonne partie du public est encore en train de se forger une opinion au sujet de la biotechnologie et du génie génétique. Les réponses aux questionnaires comportent systématiquement un nombre important de « je ne sais pas ». Les possibilités d'influencer l'opinion publique en bien ou en mal sont claires. En outre, pour les raisons évoquées plus haut, le public, et ses plus jeunes représentants en particulier, sont susceptibles d'être réceptifs à l'idée d'appliquer la biotechnologie au « verdissage » de l'industrie, à la sauvegarde de l'environnement et à une gestion plus prudente de la planète.

BIBLIOGRAPHIE

- ABBOTT, A. (1997), « German Resistance to Genetic Engineering Diminishes », *Nature* 385, pp. 8-9.
- ATLAS, R.M. (1996), « Bioremediation: A Challenge to Education and Training », *STI Review* 19, pp. 149-160.
- DECIMA RESEARCH (1996), « Research Report to Canadian Institute of Biotechnology on Public Attitudes Towards Biotechnology », Decima Research, Ottawa.
- EHRENFELD, J.R. (1994), *The Greening of Industrial Ecosystems*, National Academy Press, Washington, DC.
- EUROPEAN PUBLIC CONCERTED ACTION GROUP (1997), « Europe Ambivalent on Biotechnology », *Nature* 387:6636, pp. 845-847.
- EVANS, G. et J. DURANT (1995), « The Relationship between Knowledge and Attitudes in the Public Understanding of Science in Britain », *Public Understanding of Science* 4, pp. 57-74.
- FAO (Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture) (1996), « Joint FAO/WHO Expert Consultation on Biotechnology and Food Safety », FAO, Rome.
- HALLMAN, W.K. (1996), « Public Perceptions of Biotechnology – Another Look », *Bio/Technology* 14:1, pp. 35-38.
- HALLMAN, W. et J. METCALFE (1993), « Public Perceptions of Agricultural Biotechnology: A Survey of New Jersey Residents », Cook College, New Brunswick.
- HOBAN, T.J. (1996a), « How Japanese Consumers View Biotechnology », *Food Technology* 50:7, pp. 85-88.
- HOBAN, T.J. (1996b), « Trends in Consumer Attitudes about Biotechnology », *Journal of Food Distribution Research* 27, pp. 1-10.
- HOBAN, T.J. (1997), « Consumer Acceptance of Biotechnology: An International Perspective », *Nature Biotechnology* 15:3, pp. 232-234.
- INTERNATIONAL RESEARCH ASSOCIATES (INRA) (1991), *L'opinion des Européens concernant la biotechnologie en 1991*, Eurobaromètre 39.1, DG XII, Commission européenne, Bruxelles.
- INTERNATIONAL RESEARCH ASSOCIATES (INRA) (1993), *Biotechnologie et génie génétique. Ce qu'en pensent les Européens en 1993*, Eurobaromètre 39.1, DG XII Commission européenne, Bruxelles.
- INTERNATIONAL RESEARCH ASSOCIATES (INRA) (1997), *Les Européens et la biotechnologie moderne*, Eurobaromètre 46.1, DG X11, Commission européenne, Bruxelles.
- LYNCH, D.L. et C.E. HUTCHINSON (1992), « Environmental Education », *Proc. Nat. Acad. Sci.* 89:3, pp. 864-867.
- MACER, D.R. (1992), *Attitudes to Genetic Engineering – Japanese and International Comparisons*, Eubios Ethics Institute, Christchurch.
- MARTIN, S. et J. TAIT (1992), « Attitudes of Selected Groups in the UK to Biotechnology », dans J. Durant (éd.), *Biotechnology in Public*, pp. 28-41, Science Museum, Londres.
- MASCARENHAS, D. (1997), « Sustaining Biotechnology Education Initiatives », *Nature Biotechnology* 15:9, pp. 850-851.
- McINTYRE, T. (1996), « Environmental Applications of Biotechnology: Focus Groups », rapport non publié, Environment Canada and Industry Canada, Ottawa-Hull, Québec, Canada.
- NORMILE, D. (1996), « Scientific Literacy – Global Interest High, Knowledge Low », *Science* 274:5290, p. 1074.
- OCDE (1995), *Production et produits moins polluants*, OCDE, Paris.
- OCDE (1996), « La compréhension de la science et de la technologie par le public dans les pays de l'OCDE : analyse comparative », Symposium sur la compréhension de la science et de la technologie par le public, Tokyo.
- OCDE (1997a), *Science and Technology in the Public Eye*, OCDE, Paris.
- OCDE (1997b), *Le développement durable : Stratégies de l'OCDE pour le XXI^e siècle*, OCDE, Paris.
- RADKAU, J. (1995), dans M. Bauer (éd.), *Resistance to New Technology: Nuclear Power, Information Technology and Biotechnology*, Cambridge University Press, Cambridge.

- SPETH, J.G. (1992), «The Transition to a Sustainable Society», *Proc. Nat. Acad. Sci.* 89:3, pp. 870-872.
- SWINBANKS, D. (1997), «Blood Scandal and E-coli Raise Questions in Japan», *Nature* 385:6611, p. 9.
- TORGERSEN, H. et F. SEIFERT (1997), «Aversion Preceding Rejection: Results of the Eurobarometer Survey 39.1 on Biotechnology and Genetic Engineering in Austria», *Public Understanding of Science* 6, pp. 131-142.
- TROXELL, D.E. (1992), «Educating and Training Industrial Ecologists for the 1990s», *Proc. Nat. Acad. Sci.* 89:3, pp. 862-863.
- WADMAN, M. (1997), «Business Booms for Guides to Biology's Moral Maze», *Nature* 389:6652, pp. 658-659.
- WARD, B. (1966), *Space Ship Earth*, Hamish Hamilton, Londres.

POLITIQUES NATIONALES ET INTERNATIONALES*

- **Les politiques et les législations nationales relatives aux produits et procédés industriels propres sont souvent fondées sur des accords internationaux.**
- **L'action des pouvoirs publics joue un rôle moteur de premier plan dans le développement des technologies propres, mais elle peut avoir des effets négatifs ou positifs, auxquels il convient d'être très attentif.**
- **Si de nombreux pays considèrent la biotechnologie comme une technologie habilitante essentielle, ils n'en font pas un moyen privilégié pour obtenir des produits et procédés moins polluants.**
- **Les mesures qui visent le marché peuvent constituer un ressort très efficace du changement.**

INTRODUCTION

L'action gouvernementale, qui se manifeste par des réglementations, textes législatives et des directives, est considérée comme un paramètre essentiel du développement des technologies moins polluantes et, dans de nombreux cas et pays, comme le facteur principal de leur essor et de leur diffusion. Le présent chapitre contient donc une première analyse de certains domaines de la politique et de la législation, qui ont été choisis parce qu'ils sont susceptibles de favoriser le développement de produits et procédés industriels plus propres, et de couvrir des secteurs ou des activités auxquels la biotechnologie peut être appliquée avec profit. Il s'agit d'illustrer la façon dont l'action gouvernementale peut déclencher ou faciliter l'évolution vers des produits et procédés industriels plus propres. Contrairement à d'autres chapitres du présent rapport, qui couvrent des sujets assez vastes de manière globale, par exemple les secteurs industriels susceptibles d'être pénétrés par des procédés biotechnologiques plus propres (deuxième chapitre) ou les priorités de la R-D et les blocages scientifiques et technologiques qui s'y rapportent (troisième chapitre), ce chapitre ne présente qu'un échantillon de politiques et de législations adoptées à l'échelle nationale.

Les trois pays examinés (Canada, Allemagne et Japon), à l'instar de bien d'autres pays de l'OCDE, s'intéressent de près à la question des produits et procédés industriels plus propres et ont à cœur de la résoudre. Ils ont prêté leur concours dans ce domaine en prenant une part active à l'établissement du présent rapport. Les informations sont tirées d'entretiens avec des responsables de l'élaboration des politiques et des experts des pays respectifs, ainsi que des publications parues sur ce sujet. L'annexe 6 contient une sélection d'exposés succincts sur leurs lois et initiatives en matière d'action publique. Il aurait certainement été utile de présenter des informations comparables sur d'autres pays, mais un tour d'horizon complet des 29 pays Membres de l'OCDE et de quelques pays en développement importants a été jugé irréalisable à ce stade.

Il faut savoir que ces trois pays, situés sur trois continents différents, ont de nombreux points communs : ils sont relativement grands et fortement industrialisés, ont une connaissance approfondie des problèmes d'environnement et ont atteint un stade de développement scientifique et

* Ce chapitre a été rédigé sous la responsabilité de V. Aidun, Industrie Canada, à la suite de D. Mahon (Canada).

technologique élevé. Parallèlement, les différences entre leurs systèmes juridiques et leurs pratiques sont susceptibles d'affecter l'évolution vers des produits et procédés plus propres. Les similitudes soulèvent des questions qui doivent, pour l'instant, rester sans réponse. L'étude de nombreux autres pays (petits mais fortement industrialisés, plus pauvres, ou dotés de traditions juridiques et sociales très différentes) conduirait-elle à des conclusions radicalement différentes à propos de la pertinence de l'action des pouvoirs publics et de la législation? Certains des points communs entre les trois pays et des conclusions s'appliquant aux trois ont des chances d'être valables pour une bonne partie des autres pays, mais il faudrait conduire des recherches supplémentaires pour s'en assurer.

LA DIMENSION INTERNATIONALE

L'une des caractéristiques les plus visibles des mesures destinées à promouvoir les technologies plus propres est le fait qu'elles découlent d'accords et de conventions internationales, qui leur confère une forte dimension internationale. Cette dimension internationale peut expliquer nombre de similitudes entre les politiques suivies au niveau national. La Conférence des Nations Unies sur l'environnement et le développement (CNUED), qui s'est tenue à Rio de Janeiro en 1992, et en particulier son Programme Action 21, ont joué un rôle majeur à cet égard. Les répercussions internationales et nationales de la conférence sont résumées dans l'encadré 6.1.

Néanmoins, les mesures nationales dans ce domaine ne découlent pas toutes d'accords internationaux. Certains pays indiquent qu'ils possèdent une législation nationale en faveur des technologies moins polluantes depuis de nombreuses années et qu'ils ont anticipé sur certaines conventions internationales décisives. Il existe une interaction constante entre l'évolution des politiques nationales et internationales dans ce domaine, et l'équilibre entre les deux varie au fil du temps et selon les pays.

La Conférence de Rio a cependant accru la prise de conscience du fait que le développement durable et la croissance économique passent par des changements fondamentaux dans les procédés industriels. La nécessité de réduire la production et le rejet de polluants concerne les économies nationales ainsi que la qualité de l'environnement de chaque pays et du monde, et découle du fait que la notion de « société jetable » n'est pas viable. Les gouvernements, des organismes internationaux tels que les Nations Unies et l'OCDE, et l'industrie elle-même, ont donc pris des initiatives visant à promouvoir des principes destinés à améliorer les procédés industriels, en vue de diminuer la quantité, et bien souvent le type, de sous-produits et de contaminants, et de mettre au point de nouveaux produits et procédés capables de réduire les incidences néfastes des procédés industriels sur l'environnement.

Les activités industrielles peuvent avoir des retombées négatives sur de nombreux aspects de l'environnement, tels que la qualité de l'air et de l'eau, la productivité du sol et même la productivité des océans et le climat mondial. Si aucune action isolée n'est à même de faire progresser les pratiques industrielles moins polluantes, l'impact combiné de nombreuses actions directes et indirectes, conduites à l'échelon national et international, a entraîné des changements appréciables dans l'activité industrielle.

La nécessité d'améliorer l'utilisation des ressources et de réduire la quantité de déchets et de polluants engendrés par les activités industrielles, aux échelons local, régional et mondial, est de mieux en mieux comprise. Cette évolution s'appuie sur la prise de conscience du caractère limité des ressources naturelles, y compris des ressources renouvelables, et sur la volonté d'améliorer l'efficacité industrielle afin de protéger l'environnement et la santé humaine aux échelons national, régional et mondial. Les polluants générés et émis dans un pays peuvent se propager à d'autres à travers l'air et l'eau ou sous forme de déchets accompagnant les produits finis. La lutte contre la pollution coûte chaque année plus cher à la société.

Encadré 6.1. La Déclaration de Rio : implications nationales et internationales

En 1992, Rio de Janeiro a accueilli la Conférence des Nations Unies sur l'environnement et le développement (CNUED), à la suite de la recommandation de la Commission mondiale sur l'environnement et le développement (Bruntland, 1987). Le rapport de la CNUED a donné lieu à l'établissement d'un plan d'action, le Programme Action 21, destiné aux gouvernements et aux organisations internationales, et chargé la Commission du développement durable (CDD) des Nations Unies de coordonner les actions internationales destinées à réaliser les objectifs du Programme Action 21.

La CNUED a défini un cadre d'action, et les gouvernements ont approuvé une série de principes ou de politiques conçus pour permettre à la planète de s'acheminer vers un régime de développement durable. Ces politiques s'appuient sur des préoccupations relatives à l'environnement, qui est indispensable à la vie, et sur la nécessité d'enregistrer une croissance économique et de créer des richesses. Elles partent du principe que l'industrie doit pouvoir exploiter, sans les détruire, toutes les ressources de la Terre, y compris celles qui ne sont pas d'habitude associées au développement industriel, telles que l'air, l'eau et les habitats naturels. Le concept de viabilité écologique inclut implicitement des mesures destinées à protéger l'environnement et à réduire les impacts négatifs de l'utilisation des ressources et du développement sur l'environnement. Dans un contexte industriel, ce concept est véhiculé par l'expression « produits et procédés industriels propres ».

Après avoir reconnu que la plupart des questions et des stratégies seraient mieux traitées à l'échelon national, les participants ont décidé que les pays rendraient compte chaque année de leurs efforts pour mettre en œuvre ces stratégies dans un rapport adressé à la CDD qui, à son tour, serait chargée de présenter les résultats aux Nations Unies. Les pays font régulièrement état, en particulier, de leurs activités juridiques, réglementaires, industrielles et sociales en rapport avec la biotechnologie, qui est couverte par le chapitre 16 du Programme Action 21. Ce chapitre a pour objet de favoriser l'élaboration de principes internationaux destinés à assurer une gestion écologiquement saine de la biotechnologie, à inspirer confiance au grand public, à encourager le développement d'applications durables de la biotechnologie, et à créer des mécanismes d'appui adéquats, en particulier dans les pays en développement, grâce aux activités suivantes :

- accroître la productivité des cultures vivrières et fourragères et des matières premières renouvelables;
- améliorer la santé publique;
- renforcer la protection de l'environnement;
- renforcer la sécurité et mettre au point des mécanismes internationaux de coopération;
- créer des mécanismes d'incitation favorisant le développement de la biotechnologie et son application écologiquement rationnelle.

Parallèlement, les participants à la CNUED ont reconnu que certaines questions étaient d'envergure planétaire et ne pouvaient être traitées efficacement que par une action coordonnée au niveau international. C'est pourquoi la CNUED a mis en place plusieurs organismes, pour la plupart sous la tutelle administrative du Programme des Nations Unies pour l'environnement (PNUE). Il s'agit de la Convention sur la diversité biologique (CDB), de la Convention sur le commerce international des espèces sauvages de faune et de flore menacées d'extinction (CITES) et de la Convention-cadre sur les changements climatiques (CCC); celles-ci complètent des conventions qui existaient déjà, telles que la Convention de Bâle sur le contrôle des mouvements transfrontières de déchets dangereux et de leur élimination, la Convention de Vienne pour la protection de la couche d'ozone et le Protocole de Montréal relatif à des substances qui appauvrissent la couche d'ozone. Ces conventions traitent de questions précises, mais elles autorisent aussi les pays qui les ratifient à élaborer des protocoles appropriés ou une législation internationale, que les pays signataires sont tenus d'appliquer à la suite de la ratification du protocole ou de la législation. C'est le cas du Protocole de Montréal et du futur Protocole sur la biosécurité des mouvements transfrontières d'organismes vivants modifiés, en cours d'élaboration par la CDB.

Il existe donc une hiérarchie des actions internationales qui concourent au développement de produits et procédés industriels plus propres. Les stratégies conçues dans le cadre de la CNUED sont essentiellement nationales, mais la Commission du développement durable les examine et les analyse. Les mesures internationales visant des questions particulières sont régies par les conventions et peuvent déboucher sur une réglementation internationale par l'intermédiaire des protocoles élaborés au titre des conventions. Ces protocoles sont ensuite transposés dans les législations nationales pour être mis en œuvre.

Encadré 6.2. Le réchauffement planétaire

Les participants à la troisième session de la Conférence des parties à la Convention-cadre sur les changements climatiques des Nations Unies (CCCC), qui s'est déroulée à Kyoto du 1^{er} au 10 décembre 1997, ont approuvé un protocole dans lequel chacune des parties à la Convention s'engage à réduire, d'ici à 2010, ses émissions de gaz à effet de serre comme le dioxyde de carbone (CO₂). Le protocole stipule que l'Union européenne s'engage à réduire dans ce délai ses émissions de gaz à effet de serre de 8 pour cent par rapport au niveau enregistré en 1990 (année de référence), les États-Unis de 7 pour cent, et le Japon et le Canada de 6 pour cent.

Il est essentiel que l'industrie abaisse sa consommation d'énergie afin de poursuivre son développement tout en contribuant à la réalisation de ces objectifs. Il faudrait pour ce faire remplacer les procédés pétrochimiques industriels actuels, qui consomment de grandes quantités d'énergie dans des conditions de pression et de température élevées, par des procédés biologiques ayant un meilleur rendement énergétique, et utilisant des ressources renouvelables comme la biomasse pour produire des substances utiles dans des conditions normales de pression et de température. À l'avenir, par exemple, les procédés seront davantage axés sur la production rentable de carburants de remplacement, tels que l'éthanol, qui ont moins d'incidence sur le réchauffement planétaire et qui sont également susceptibles d'engendrer des produits respectant l'environnement, comme les matières plastiques biodégradables, qui sont automatiquement décomposées dans le milieu naturel après usage.

Il s'ensuit que la biotechnologie est appelée à devenir un outil de plus en plus précieux pour la mise au point de produits et procédés respectueux de l'environnement et la prévention du réchauffement planétaire.

POINTS COMMUNS DES POLITIQUES NATIONALES

Conscients de la nécessité d'adopter des pratiques industrielles moins polluantes, de nombreux gouvernements ont pris des mesures et élaboré une législation en vue de réduire l'utilisation ou la production de substances chimiques ou de procédés susceptibles de dégrader l'environnement ou d'accroître les risques pour la santé et la vie humaine ainsi que pour les animaux.

De fait, un nombre important et grandissant d'initiatives juridiques et autres sont prises pour encourager les technologies moins polluantes, et s'appliquent donc implicitement à la biotechnologie industrielle propre. Les pays sont déjà en mesure de cerner les actions qui ont eu des effets bénéfiques, non seulement sur l'environnement et la durabilité, mais aussi sur les progrès technologiques et le développement économique. Dans certains pays, les lois de protection de l'environnement suscitent la mise au point de produits et procédés nouveaux et novateurs, qui augmentent l'efficacité industrielle et favorisent l'essor des secteurs industriels concernés. Par suite, de nouveaux emplois ont déjà été créés et bien d'autres devraient voir le jour dans les années à venir. D'autres réglementations sont cependant considérées comme des entraves aux avancées scientifiques, technologiques et économiques, et même à la protection de l'environnement par les meilleurs moyens disponibles, si bien que leur modification s'impose. Comme le contexte juridique et réglementaire s'appliquant aux produits et procédés industriels plus propres peut avoir des effets à la fois positifs et négatifs, il faut tenir compte des deux.

À l'heure actuelle, une étude du Canada, de l'Allemagne et du Japon laisse entrevoir certains éléments communs. Tout d'abord, aucune législation nationale ou internationale ne privilégie explicitement la biotechnologie comme moyen d'obtenir des produits et procédés plus propres. En ce qui concerne les possibilités d'utiliser la biotechnologie pour créer des produits et procédés plus propres, les pays considèrent la biotechnologie comme une « technologie habilitante » essentielle, catégorie qui doit être placée dans un contexte propice à l'émergence de produits et procédés industriels moins polluants.

Parce qu'elles sont universelles, les technologies habilitantes ne font généralement pas l'objet d'une législation spécifique. Généralement, les politiques stipulent clairement les objectifs, mais n'exposent pas en détail les moyens de les atteindre. Si bien que lorsqu'une mesure a été élaborée pour tel ou tel secteur, elle fait rarement état de technologies particulières. Dans les domaines d'action de portée très générale, comme la réduction des déchets ou la consommation d'énergie, la modification des habitudes de consommation ou le recyclage, diverses options technologiques peuvent s'offrir.

De plus, chaque pays adapte la mise en œuvre des politiques à sa culture nationale, en faisant appel à une panoplie de moyens stratégiques et juridiques, d'initiatives volontaires et d'instruments économiques. Certains éléments sont relativement nouveaux, et sont de plus en plus couramment utilisés pour favoriser le développement durable. L'un d'entre eux consiste à faire participer et à orienter la société, considérée dans son rôle de consommateur final et donc de moteur principal potentiel, particulièrement au Japon.

Étant donné que les préoccupations relatives à la pollution de l'environnement et à la production de déchets forment l'une des principales incitations au développement de produits et procédés industriels moins polluants, la plupart des textes de loi et des politiques visent la prévention de la pollution et des déchets. Leur mise en œuvre, notamment pour réduire la consommation d'énergie ou le gaspillage d'énergie dans la fabrication, appelle d'autres dispositions législatives ou réglementaires. Dans la mesure où des secteurs ou des procédés déterminés sont visés par la législation, et où les objectifs sont fixés par les pouvoirs publics ou par des initiatives volontaires, la nécessité d'innover s'accroît.

Les mesures qui s'adressent au grand public sont susceptibles d'avoir les effets les plus marqués. Si les habitudes des consommateurs changent et si la demande de produits plus propres se généralise à mesure que les produits propres sont identifiés, les fabricants devront s'adapter à cette demande. L'action des pouvoirs publics répondra alors aux souhaits du public et deviendra un instrument économique induisant une transformation des méthodes de fabrication.

Certains des secteurs qui doivent adopter des pratiques moins polluantes ont été clairement désignés. Chaque pays étudié juge nécessaire de diminuer la consommation d'énergie pour des raisons économiques, en optant pour des procédés ayant un meilleur rendement énergétique. Les pays ont également cherché à introduire des transformations au stade de la production d'énergie, à travers des systèmes novateurs de génération d'énergie, car l'utilisation de combustibles fossiles engendre des gaz à effet de serre et contribue au réchauffement planétaire.

La question de la production et de l'élimination des déchets a aussi retenu une grande attention. L'accent a été mis sur la réduction de la quantité de déchets produits grâce à des initiatives volontaires et à des mesures réglementaires. Cet objectif se manifeste clairement par les efforts destinés à augmenter l'utilisation des matériaux recyclables dans la mise au point des produits, et par l'utilisation accrue de matériaux renouvelables dans les produits. L'industrie a abordé cette question sous différents angles, très souvent par le biais de l'analyse du cycle de vie (voir le quatrième chapitre).

En outre, des matières toxiques déterminées sont recensées et des mesures sont prises pour les réduire ou les éliminer. Le but est de modifier les procédés industriels qui font appel à ces substances. Les solutions de remplacement peuvent alors être spécifiées. C'est ainsi que des substances chimiques déterminées ont été identifiées aux niveaux national ou international en vue de leur réduction ou de leur élimination. Il s'agit le plus souvent de substances persistantes, bio-accumulables et toxiques ; les produits chimiques fortement chlorés sont particulièrement visés par les mesures de réduction ou d'élimination. L'OCDE, par exemple, a lancé une initiative devant permettre de contrôler l'utilisation industrielle des substances chimiques toxiques à travers la « procédure de notification des produits chimiques nouveaux », qui exige que les produits chimiques nouveaux fassent l'objet d'une notification et d'une évaluation avant leur mise sur le marché. Des mesures et dispositions législatives nationales complémentaires répondent aux prescriptions internationales et offrent une base nationale aux actions concernant la production et le rejet de substances toxiques. Ces initiatives ont aussi été complétées par des actions engagées volontairement par l'industrie.

La mise au point de produits et procédés industriels plus propres vise la réalisation d'objectifs sociaux, économiques et de sécurité spécifiques. Deux aspects ayant trait à la législation et à l'action des pouvoirs publics ne sont pas traités dans ce chapitre : la politique en matière de recherche, abordée au troisième chapitre, et la politique économique visant les produits et procédés plus propres, qui a été examinée dans *Production et produits moins polluants* (OCDE, 1995).

L'étude des domaines suivants mériterait d'être approfondie :

- les changements sectoriels, les tendances de la recherche et les projets de recherche qui relèvent de la biotechnologie industrielle, afin de déterminer si ces travaux de recherche s'alignent sur les objectifs stratégiques et législatifs ;
- la législation et son incidence sur la biotechnologie visant des produits et procédés industriels plus propres ;
- l'interaction entre la recherche et la législation, considérées en tant que moteurs ;
- la relation entre l'économie et la législation.

BIBLIOGRAPHIE

- BRUNDTLAND, G. (1987), *Our Common Future*, Oxford University Press, Oxford.
OCDE (1995), *Production et produits moins polluants*, OCDE, Paris.

CONCLUSIONS ET IMPLICATIONS POUR L'ACTION DES POUVOIRS PUBLICS

Le présent rapport traite de la biotechnologie en tant que moyen d'obtenir une production industrielle moins polluante. Il considère la biotechnologie dans un contexte national et planétaire et la place dans la perspective de la viabilité écologique de l'industrie. La caractéristique essentielle de la technologie propre tient au fait qu'elle fait porter l'attention et les actions, non plus sur la dépollution, mais sur la prévention de la dégradation de l'environnement. Les données disponibles montrent que la biotechnologie peut apporter une contribution considérable à «l'écologisation» de l'industrie, et qu'elle est compétitive sur le plan économique.

Il est donc paradoxal que la biotechnologie ait pénétré lentement dans certains secteurs de l'industrie. Bon nombre des explications avancées dans le passé ne sont plus valables. Parmi les plus périmées, citons celles affirmant que la propreté de la biotechnologie n'a pas été prouvée, que les coûts et les risques sont trop élevés, ou, que l'échelle des opérations est trop restrictive. Les exemples fournis dans le présent rapport montrent, au contraire, que les arguments visant à ajourner l'adoption de la biotechnologie en raison d'une échelle d'application ou d'une capacité de traitement limitées, ou en raison de la nécessité perçue de remplacer une grande partie du matériel des installations de fabrication, ne sont plus défendables.

La transition vers des procédés de fabrication industrielle moins polluants n'exige pas nécessairement le renouvellement complet et coûteux des usines et de l'équipement. L'introduction d'étapes biotechnologiques permettra souvent de parvenir au résultat souhaité, ou bien l'installation existante pourra être adaptée aux procédés biotechnologiques. Des ponts devront toutefois être jetés entre la recherche fondamentale et l'application finale, et le meilleur moyen d'y parvenir serait d'établir des partenariats entre les pouvoirs publics, les universités et l'industrie en vue de démontrer l'applicabilité de la biotechnologie. En outre, une analyse rigoureuse devra fournir la preuve de l'amélioration de la propreté.

Les dix points énumérés ci-après récapitulent certaines des conclusions les plus importantes du présent rapport et indiquent les tâches qui incombent aux principales parties prenantes, à savoir les pouvoirs publics, mais aussi l'industrie, la population et la communauté scientifique, en vue d'atteindre un objectif hautement souhaitable et réalisable. L'action commune étant considérée comme un élément déterminant, le débat entre les parties prenantes est capital. Ces interactions sont indispensables pour établir le programme d'action et définir les rôles des parties intéressées dans la mise en œuvre de ces recommandations.

Les préoccupations d'environnement de portée mondiale susciteront un intérêt croissant pour les produits et procédés industriels propres. La biotechnologie peut contribuer à abaisser la consommation d'énergie et la production de polluants tels que les gaz à effet de serre et les pluies acides. Certains secteurs industriels apporteront un concours plus marqué que d'autres à cet égard. L'utilisation de produits de départ renouvelables d'origine biologique à la place des combustibles fossiles peut être une source de procédés neutres du point de vue de la formation de dioxyde de carbone, qui freineront l'accumulation de ce polluant dans l'atmosphère. La biotechnologie peut produire des combustibles plus propres qui contribueront aussi à atténuer d'autres problèmes de pollution atmosphérique.

La biotechnologie est une technologie habilitante qui peut contribuer puissamment à la propreté des produits et procédés industriels et offrir ainsi une base à la viabilité écologique de l'industrie. Indépendamment des méthodes scientifiques chimiques ou physiques, la biotechnologie devient de plus en plus compétitive pour abaisser la consommation d'énergie et de matières et réduire au minimum les déchets et les émissions. La biotechnologie, qui possède l'avantage de s'appuyer sur des systèmes biologiques qui ont évolué sur plusieurs millions d'années et qui s'auto-perfectionnent constamment, bénéficie d'un vaste champ d'application. Les procédés biotechnologiques, en particulier les technologies enzymatiques (procédés biocatalytiques), ont tendance à se dérouler à plus basse température que les procédés chimiques classiques, et à engendrer des déchets et des émissions moins toxiques et en moindres quantités. Les industries devraient recourir à la biotechnologie lorsque celle-ci offre de nets avantages du point de vue de l'environnement.

Évaluer la propreté d'un produit ou procédé industriel constitue une opération essentielle, mais complexe ; l'analyse du cycle de vie (ACV) est le meilleur outil dont on dispose à l'heure actuelle pour effectuer cette détermination. Il est nécessaire d'examiner un procédé dans sa totalité (« du berceau à la tombe »), afin de dresser son bilan énergétique et son bilan matière, et de déterminer par conséquent sa propreté. Pour être en mesure de prendre une décision industrielle en connaissance de cause, il est indispensable de savoir ce qui est « propre » ou « plus propre ». Le meilleur moment pour réaliser une ACV ou une analyse analogue se situe aux premiers stades d'un projet de R-D, lorsque l'analyse peut contribuer à déterminer les avantages du point de vue de l'environnement d'un procédé biotechnologique propre. Il y a lieu d'harmoniser l'ACV avec d'autres méthodes, notamment la « comptabilité écologique » et d'autres types de procédures permettant de fixer des objectifs. La définition des limites d'une ACV (points où commence et s'achève le procédé analysé) et de la pondération (importance relative) des facteurs entrant dans l'analyse passe par des règles simples en matière de décision. L'amélioration des procédures d'ACV et l'élaboration d'outils supplémentaires pour évaluer la propreté ainsi que les avantages environnementaux et économiques connexes, fera progresser l'utilisation industrielle des technologies propres.

Les procédés biotechnologiques industriels sont gouvernés en premier lieu par l'économie (forces du marché), l'action des pouvoirs publics et la science et la technologie. Ces moteurs de la biotechnologie visant des produits et procédés industriels non polluants varient entre les secteurs. Les forces du marché répondent à la rentabilité de l'introduction de technologies propres ; l'action des pouvoirs publics reflète l'intérêt de la population pour un environnement moins pollué ; la science et la technologie forment la base et livrent les méthodes permettant d'établir la faisabilité technique. Ces trois facteurs agissent de concert, et aucun d'entre eux ne peut à lui seul induire l'utilisation de la biotechnologie.

En vue d'élargir la pénétration de la biotechnologie appliquée à des fins de préservation de l'environnement, les pouvoirs publics et l'industrie devront déployer un effort conjoint de R-D. A moins que les avantages à obtenir ne soient prouvés, le secteur privé consentira rarement les investissements nécessaires pour élaborer des procédés biotechnologiques et les intégrer aux systèmes existants. Cela est particulièrement vrai pour une technologie nouvelle, lorsque les marges bénéficiaires sont incertaines et difficilement quantifiables par rapport aux technologies classiques. La biotechnologie a fait ses preuves dans la production de spécialités chimiques de haute valeur et, en ce qui concerne la fabrication de produits chimiques de base, sa compétitivité a été démontrée dans plusieurs cas. Les pouvoirs publics doivent contribuer à la démonstration, au développement et à la diffusion des informations pertinentes, et favoriser la prise de conscience par le public et la mise en place de capacités. Il est nécessaire d'instaurer des partenariats réunissant les compétences des pouvoirs publics, de l'industrie et de la population, pour que l'industrie devienne écologiquement viable et qu'elle ait recours à la biotechnologie.

Pour exploiter à fond les potentialités de la biotechnologie en tant que source de produits et procédés industriels propres, au-delà de ses applications actuelles, il sera nécessaire d'approfondir la R-D. De nouveaux biocatalyseurs et bioréacteurs devront être mis au point pour que la biotechnologie pénètre dans les industries qui utilisent traditionnellement des produits de départ pétrochimiques et conduisent leurs réactions dans des conditions de pression et de température élevées. La

prospection des ressources biologiques, notamment dans des milieux extrêmes, sera utile pour trouver de nouvelles sources de biocatalyseurs. Pour répondre aux exigences de nombreux procédés industriels, il faudra combiner des activités biocatalytiques, en faisant appel à des cultures mixtes et à la technologie de l'ADN recombiné. La stabilité à long terme de l'activité biocatalytique et la réduction au minimum des besoins en eau, obtenues grâce à la conception de bioréacteurs spéciaux, à l'emploi de cellules et d'enzymes immobilisées et à la biocatalyse en milieu non aqueux, joueront un rôle décisif dans l'accroissement de la propreté des procédés et la réduction des coûts. L'intégration des traitements par voie biologique dans les opérations commerciales existantes passera par des innovations techniques. L'appui des pouvoirs publics et de l'industrie aux efforts de R-D, notamment pour faciliter les accords de coopération volontaires, sera important à l'égard de l'innovation et essentiel pour consolider l'avancée des biotechnologies. De tels efforts conjoints en faveur des projets de démonstration sont indispensables pour que la recherche fondamentale débouche sur des applications à l'échelle industrielle. En outre, l'université est invitée à participer en conduisant des travaux de recherche fondamentale et en dispensant des formations, à l'appui des applications biotechnologiques.

Le rôle croissant de la biotechnologie, y compris l'ADN recombiné et ses applications, dans la création de produits à valeur ajoutée et dans le développement des biocatalyseurs appelle impérativement l'adoption de réglementations et de lignes directrices harmonisées et souples. Les réglementations visant la biotechnologie doivent être suffisamment dynamiques et souples pour s'adapter au fait que la science et la technologie évoluent constamment, tout comme les connaissances et la pratique des scientifiques et des responsables de la réglementation. L'harmonisation internationale des principes sous-tendant la surveillance exercée par les pouvoirs publics, notamment celle qui se rapporte aux applications industrielles des biocatalyseurs issus d'une recombinaison, est déterminante à l'égard de la levée des obstacles qui freinent la pénétration des procédés biotechnologiques propres dans l'industrie. Les pouvoirs publics devraient rationaliser les lignes directrices et les systèmes de surveillance pertinents dans ce contexte en vue d'assurer leur clarté et leur fondement scientifique, afin que des produits et procédés industriels propres puissent être réalisés à l'aide de la biotechnologie moderne. La clarification de l'application des bonnes pratiques de production industrielle à grande échelle, notamment en ce qui concerne les limites de l'utilisation confinée, et la fourniture d'orientations concises pour l'analyse des risques, seront très utiles aux industries qui envisagent de recourir à la biotechnologie pour obtenir des procédés industriels propres.

Les forces du marché peuvent fournir des incitations très puissantes à la réalisation des objectifs de préservation de l'environnement. Le marché est généralement le déclencheur principal de la diffusion technologique. Alors que le public est prêt à soutenir les politiques gouvernementales qui encouragent les produits et procédés industriels propres, les consommateurs répugnent à payer tout surcoût dû à l'adoption de procédés de production non polluants. Les mécanismes du marché autorisent une grande souplesse dans l'élaboration des mesures destinées à atteindre les objectifs d'environnement; l'industrie peut réagir de diverses manières à la lutte antipollution, notamment par des changements de procédés, le développement technologique et la modification des produits. Les aspects économiques, notamment les dépenses d'investissement et le coût de la mise en conformité avec les réglementations d'environnement, sous-tendent les décisions prises par l'industrie au sujet de la mise en œuvre des technologies nouvelles. Les pressions du marché ont tendance à susciter une réaction rapide de la part de l'industrie, en particulier lorsqu'elles ont une incidence sensible sur la rentabilité. La demande du marché favorise efficacement la pénétration des procédés biotechnologiques propres dans l'industrie et la fabrication de « produits verts ». Les forces du marché, qui peuvent fournir des incitations très puissantes à la réalisation des objectifs d'environnement, représentent un pendant valable à la réglementation.

Il se peut que les mesures adoptées par les pouvoirs publics en vue de promouvoir la propreté des produits et procédés industriels aient l'incidence la plus décisive sur la mise au point et l'utilisation industrielle des procédés biotechnologiques propres. La législation, la réglementation, les lignes directrices et les normes fixées par les pouvoirs publics, la passation de marchés publics et la R-D financée sur fonds publics peuvent encourager ou décourager – accélérer ou retarder – l'utilisation de procédés non polluants fondés sur la biotechnologie. Les obstacles peuvent découler des facteurs

suivants : absence de ligne de conduite ou non-respect des mesures, harmonisation internationale insuffisante, incertitudes ou contradictions liées à l'action des pouvoirs publics et politiques ne tenant pas compte des conditions particulières à chaque secteur. Les pouvoirs publics devraient encourager les meilleurs procédés technologiques non polluants et stimuler leur large diffusion dans l'industrie. Ils peuvent fournir des incitations à mettre en œuvre des procédés technologiques propres, afin de favoriser l'utilisation de la biotechnologie lorsqu'elle est jugée appropriée à l'issue d'une analyse économique et d'une évaluation de ses effets sur l'environnement.

Une action de communication et de sensibilisation sera nécessaire pour que la biotechnologie contribuant à la propreté des produits et procédés gagne du terrain dans divers secteurs industriels. La pénétration à grande échelle de la biotechnologie propre dans l'industrie passe par le soutien du public aux produits et procédés industriels propres. L'évaluation des risques, menée sur une base scientifique, est essentielle pour accroître la transparence et faire mieux accepter la biotechnologie. La responsabilité de la gestion et de la communication des risques est assumée différemment selon les pays Membres. Il est capital que la biotechnologie soit mieux connue de la population, des dirigeants d'entreprises, des ingénieurs et des responsables de l'élaboration des politiques et de la réglementation. La communication à travers les médias est importante pour souligner les avantages et les limites des procédés biotechnologiques propres. Le public devra être informé sur la biotechnologie et les pratiques industrielles non polluantes, au travers de programmes d'éducation formelle et de vulgarisation facilement accessibles.

MODÈLES DE DURABILITÉ INDUSTRIELLE*

Traditionnellement, on structure les procédés industriels en ensembles linéaires d'étapes unitaires que l'on exécute généralement de façon indépendante et comme s'il s'agissait d'un flux isolé de matières et d'énergie. Ces modèles supposent la disponibilité de ressources illimitées et représentent ce que l'on appelle l'écologie de type I. A l'opposé, l'écologie de type II, qui se fonde sur des communautés biologiques interactives et des ressources limitées, revêt un caractère quasi cyclique et se révèle plus efficiente que les écosystèmes de type I. Elle n'est toutefois pas durable sur de longues périodes, car les flux y sont en grande partie unidirectionnels. En revanche, les écosystèmes biologiques durables (type III) sont presque intégralement cycliques; les ressources et les déchets ne sont ni définis ni différenciés (Graedel, 1997), dans la mesure où les déchets de l'un des composants de l'écosystème servent de ressources à un autre. Exception faite des intrants provenant de sources photosynthétiques et chimiosynthétiques, les écosystèmes de type III sont cycliques et donc durables.

Plusieurs modèles de durabilité industrielle ont été proposés. L'un d'eux se fonde sur quatre nœuds représentant la fourniture des matières, la transformation/fabrication des matières, la consommation et le traitement des déchets. Plus ces nœuds fonctionnent en relation étroite les uns avec les autres, plus le système dans son ensemble tend vers un flux cyclique et une écologie de type III. Pour Graedel (1997), le système qui assure actuellement la durabilité industrielle est celui qui dissocie fondamentalement et rend relativement indépendants les intérêts des trois acteurs que sont le fournisseur de matières premières, le fabricant et le client. Par conséquent, pour se rapprocher de l'écologie de type III, une coopération plus étroite est nécessaire entre les fournisseurs, les concepteurs des matériels et des procédés et les ingénieurs de procédés. La Conception écologique (chapitre 3), qui vise à maximiser le rendement énergétique et le recyclage en cours de fabrication et après utilisation, propose un moyen d'évaluer le choix des matières premières, ainsi que la minimisation et les caractéristiques des émissions atmosphériques et des déchets liquides et solides. Graedel fait valoir que, pour que la durabilité industrielle réponde réellement aux problèmes mondiaux de santé et d'environnement, ces problèmes doivent être classés par ordre d'importance; il propose un «classement quelque peu arbitraire» de douze grands effets sur l'environnement. Le tableau 1.1 de l'annexe relie les questions jugées importantes dans la conception industrielle à leurs effets sur l'environnement et, ce faisant, esquisse une première hiérarchie des actions devant déboucher sur des technologies propres.

* Toutes les références mentionnées dans le texte des présentes annexes se trouvent à la fin des chapitres pertinents.

Annexe : Tableau 1.1. **Liens entre les questions à prendre en compte dans la conception d'une technologie propre et les effets sur l'environnement**

| Questions de conception | Effets sur l'environnement | | | | | | | | | | | |
|---|----------------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| Matières premières | | L | | | | | | M | | | | |
| Émissions atmosphériques | L | | L | M | | | M | | M | M | M | M |
| Déchets liquides | M | | | | M | | | | | | | |
| Déchets solides | L | | | | | M | | | | | | |
| Rendement énergétique | | | M | | | | | | L | | | |
| Recyclage | | L | | | | L | | L | | | | |
| Modification de l'utilisation des terres (augmentation de la population ou des terres cultivées) | | M | | | | M | | | M | | | |

Définitions :

- 1 = nécessité de minimiser ou éliminer les effluents toxiques.
 - 2 = nécessité de protéger la diversité biologique.
 - 3 = réchauffement par effet de serre.
 - 4 = destruction de la couche d'ozone.
 - 5 = qualité des eaux souterraines et de surface.
 - 6 = manque de sites de décharge appropriés.
 - 7 = production de smog photochimique.
 - 8 = épuisement des gisements de minerais.
 - 9 = recul du pouvoir oxydant de l'air.
 - 10 = production de pluies acides.
 - 11 = effet corrosif en milieu atmosphérique et liquide.
 - 12 = détérioration de la visibilité atmosphérique résultant de la croissance démographique ou du développement de l'agriculture.
- M = effet majeur;
L = effet moindre.

Source : Graedel, 1997.

Annexe 1.2

INNOVATIONS EN MATIÈRE DE CHIMIE PROPRE**CATALYSEURS**

De nouveaux catalyseurs, qui contribuent de façon significative à la propreté des procédés industriels, ont été développés avec succès par les chimistes :

- Les catalyseurs de transfert de phase comme les éthers couronnes permettent des réactions moins polluantes sur l'ensemble des phases séparées (liquides immiscibles, solide-liquide, liquide-gaz).
- Certains catalyseurs, tels que les triflates de lanthane utilisés pour les réactions de nitration, empêchent la formation de sous-produits dangereux.
- Les catalyseurs chimiques dotés de propriétés chirales (la chiralité est une propriété stérique de certaines molécules qui leur confère une configuration gauche ou droite). Les produits et intermédiaires chiraux sont particulièrement importants du fait de leurs propriétés biologiques. Dans la commercialisation de produits pharmaceutiques et agrochimiques, la production de molécules stéréospécifiques pures devient incontournable. D'ores et déjà, certains pays proposent l'instauration d'une taxe sur les ingrédients actifs qui obligeront ces secteurs et d'autres à fournir des isomères optiques purs.

La R-D dans le domaine des catalyseurs chimiques chiraux est parvenue à un stade extrêmement intéressant qui laisse entrevoir plusieurs possibilités :

- *Catalyseurs hétérogènes* : chiralité conférée par un alcaloïde à des catalyseurs métalliques tels que le platine, le palladium, l'iridium et le ruthénium. Exemple : hydrogénation stéréosélective.
- *Amidolithiums basiques* : la spécification de la chiralité de la base permet de synthétiser l'un ou l'autre des isomères optiques du produit. Ces catalyseurs sont faciles à séparer des réactifs, ce qui facilite leur réutilisation. Exemple : introduction d'une asymétrie dans les substances chimiques cycliques symétriques.
- *Acides polyaminés* : les homopolymères d'acides aminés peuvent présenter des propriétés catalytiques et, comme les catalyseurs eux-mêmes peuvent être produits sous l'une ou l'autre des formes chirales, on peut spécifier la chiralité du produit. La polyleucine est une matière pâteuse et insoluble en milieu organique qui peut être directement récupérée et réutilisée. Exemple : conversion d'alcènes en époxydes.

MILIEUX RÉACTIONNELS

Les fluides supercritiques trouvent un certain nombre d'applications dans l'industrie : on les emploie aux fins d'extraction, de microprécipitation et de séparation, et comme solvants et réactifs chimiques. Le recours à ces fluides promet de rendre plus sûres et moins polluantes les industries chimiques, et on estime qu'il pourrait permettre de diviser par dix la taille de certaines usines de produits chimiques. Exemple : on peut utiliser du CO₂ supercritique pour la solubilisation de matières telles que les polymères, les protéines et les oxydes métalliques, avec à la clé un allègement de la charge sur l'environnement exercée par les industries à forte intensité de solvants organiques/halogénés.

Les liquides ioniques sont des solides ioniques dont on a porté la température au-delà du point de fusion (les chloroaluminates III, par exemple, sont liquides à température ambiante). Ces matières, qui restent liquides à l'intérieur d'un très large intervalle de températures, sont présentées comme des solvants «sur mesure» et comme le point de départ d'une nouvelle technologie industrielle.

MATÉRIAUX DE SUPPORT

L'industrie chimique a développé un grand éventail de matières qui remplissent une fonction de catalyseur et/ou de matériau de support pour les réactifs et qui offrent en outre des possibilités de minimisation des déchets. A cet égard, les caractéristiques intéressantes des matières solides sont notamment leur sélectivité, la facilité de leur récupération et la possibilité qu'elles offrent de remplacer des procédés stoechiométriques par des procédés catalytiques. Exemple : une nouvelle génération de nanopolymères, les dendrones et dendrimères, suscite un intérêt croissant. Ces structures globulaires arborescentes pourraient offrir de nombreuses possibilités de rendre propres les procédés industriels, compte tenu de la diversité des propriétés (catalytiques, conductrices, paramagnétiques, d'absorption photonique) qu'il est possible de leur conférer.

AMPLIFICATEURS DE RÉACTION

Tant l'électrochimie que la sonochimie (effets des ultrasons) peuvent induire une réduction démontrable des déchets produits par les synthèses chimiques. La sonochimie, par exemple, peut accélérer les vitesses de réaction, accroître le rendement des produits, stimuler l'activation du catalyseur et déboucher sur une simplification des procédures (par exemple, des réactions peuvent intervenir à pression ambiante et non plus à des pressions très élevées).

*Annexe 2.1***DÉVELOPPEMENTS RÉCENTS DE LA BIOTECHNOLOGIE RÉPONDANT AUX BESOINS DE LA CHIMIE DES PROCÉDÉS**

Si les catalyseurs biologiques possèdent de nombreuses caractéristiques qui les rendent attrayants pour la chimie des procédés, telles qu'une forte activité biologique, ainsi qu'une sélectivité et une spécificité excellentes, ils ne sont pas très stables en tant que classe, ce qui constitue un obstacle majeur à leur utilisation industrielle. Dans la nature, les enzymes sont remplacées à l'intérieur des cellules vivantes à mesure qu'elles s'usent. En revanche, dans une usine chimique, ce remplacement est long et coûteux. Trois types de solutions ont été proposés récemment : la stabilisation des enzymes naturellement instables, le développement d'enzymes naturellement stables et l'emploi de systèmes vivants intacts pour produire des substances chimiques.

Altus Biologics, filiale de la société Vertex, a commercialisé des cristaux d'enzyme réticulés (CLEC®). De nombreuses enzymes peuvent être cristallisées, de sorte que leurs molécules occupent des points répétés à l'intérieur d'une matrice régulière à trois dimensions. Si un tel cristal d'enzyme est réticulé chimiquement, de telle façon que les molécules sont liées de manière covalente les unes aux autres et ne peuvent pas se répandre, chaque molécule enzymatique conserve son activité catalytique, et cette dernière est souvent plusieurs centaines de fois plus stable que celle de la même enzyme en solution. La forme cristalline du catalyseur permet une gestion pratique dans le milieu du procédé. Cela étant, si les CLEC apportent une solution à un problème majeur, ils restent largement perfectibles. Ainsi, les processus de cristallisation et de réticulation ne peuvent pas s'appliquer aisément à toutes les enzymes. En outre, les molécules enzymatiques au centre du cristal ne peuvent pas accéder aux petites molécules du fait d'un empêchement cinétique ni aux grandes molécules en raison d'un empêchement stérique. Néanmoins, le marché a accueilli favorablement les CLEC et il est probable que cette technologie élargira la gamme des procédés se prêtant à la biocatalyse.

Bien que les enzymes issues d'animaux, de végétaux et de nombreuses bactéries soient souvent labiles, la structure peptidique sous-jacente ne présente pour sa part aucune instabilité intrinsèque. De fait, plusieurs entreprises telles que la société Diversa Corporation s'attachent à découvrir et développer des enzymes issues de la biodiversité microbienne et nettement plus stables que les enzymes conventionnelles. Comme matière de départ, elles prennent souvent des enzymes provenant d'organismes dits extrémophiles – qui se développent en conditions extrêmes de pH, de température et de pression – dont elles améliorent parfois les propriétés au moyen d'un procédé appelé « évolution dirigée » (examiné au chapitre 2). L'évolution dirigée est un processus itératif de mutagenèse et de sélection qui permet à l'expérimentateur de modifier progressivement les propriétés d'une enzyme en lui conférant celles qui sont les plus souhaitables en vue de son utilisation dans la chimie des procédés.

Tout récemment, une nouvelle société, Photosynthetic Harvest, Inc. (PHI), a élaboré une méthode permettant de produire en continu un large éventail de substances chimiques à partir de végétaux vivants. Ces substances sont des protéines de défense et des éliciteurs naturels exsudés normalement par les racines des végétaux. En apprenant comment déclencher la production de ces molécules et comment les recueillir ensuite, PHI a ouvert la voie à l'exploitation d'une nouvelle source de produits naturels qui peuvent trouver de nombreux domaines d'application : produits pharmaceutiques, agents de sapidité, parfums, aliments fonctionnels, etc.

Annexe 2.2

PÂTES ET PAPIERS

L'industrie des pâtes et papiers constitue un pan important et en progression de l'économie mondiale. A l'échelle de la planète, sa production a augmenté, à l'instar de la consommation de papier. En règle générale, il s'agit d'un secteur à forte intensité de capital et à faible marge bénéficiaire, ce qui tend à limiter l'essai et le développement de nouvelles technologies et leur incorporation dans les unités de production. Cependant, l'industrie des pâtes et papiers se voit imposer des contraintes de plus en plus lourdes par les réglementations concernant l'environnement. Pour continuer de satisfaire la demande croissante de pâtes et papiers tout en respectant ces réglementations toujours plus strictes, le secteur recherche en permanence des améliorations technologiques. Depuis 20 ans, on a entrepris partout dans le monde des efforts de recherche afin d'appliquer la biotechnologie à la transformation industrielle du bois. Cette rapide synthèse présente différentes applications biotechnologiques des micro-organismes et de leurs enzymes dans l'industrie des pâtes et papiers, qui ont été commercialisées ou sont en cours de développement. Elle propose également une projection des développements à venir.

BIOPULPAGE

Le biopulpage consiste à traiter avant la mise en pâte les matières lignocellulosiques au moyen de champignons qui décomposent la lignine. Aujourd'hui, ce procédé se rapproche du stade de la commercialisation. Dans les années 70, Eriksson et ses collaborateurs de l'Institut suédois de recherche sur les pâtes et papiers (STFI) de Stockholm ont lancé une investigation relativement complète, qui a montré que le traitement fongique préalable des substances lignocellulosiques pouvait déboucher sur des économies d'énergie et améliorer la résistance en vue de la mise en pâte mécanique, qui consiste à séparer les fibres de bois par l'application d'une force mécanique. Ces procédés mécaniques permettent un rendement élevé (jusqu'à 95 pour cent) et produisent du papier qui a de la main et présente une bonne opacité et une excellente aptitude à l'impression. Ils consomment toutefois beaucoup d'énergie (électricité), et le papier produit est relativement peu résistant et affiche un indice de jaunissement élevé (tendance à jaunir avec le temps). Les pâtes de plusieurs essences de bois présentent une forte teneur en résine et nécessitent donc des mesures de bonification. Bien que les travaux de recherche du STFI n'aient été qu'en partie couronnés de succès (ils se sont heurtés à des difficultés lors du passage à une échelle supérieure), ils ont fourni des enseignements précieux. En 1987, le Laboratoire des produits forestiers (FPL), dépendant du Service des forêts du ministère américain de l'Agriculture (USDA), a lancé une évaluation complète de la mise en pâte biomécanique sous l'égide d'un groupement pour le biopulpage. Ce groupement, qui a eu une existence juridique d'avril 1987 à août 1996, réunissait le FPL, les universités du Wisconsin et du Minnesota, l'*Energy Center of Wisconsin* et 22 entreprises liées à l'industrie des pâtes et papiers.

Le groupement a évalué la faisabilité économique du biopulpage par rapport à la mise en pâte mécanique à l'échelle pilote. Étala sur deux semaines et respectueux de l'environnement, le procédé augmente de 30 pour cent le débit de la papeterie ou réduit d'au moins 30 pour cent ses besoins en électricité à débit égal. En outre, il s'est traduit par un accroissement de la résistance du papier. Des études menées en laboratoire ont examiné plus de 30 variables qui influencent le biopulpage : espèce et souche de champignons, forme et quantité de l'inoculum, essence de bois, taille des copeaux de bois, facteurs d'ambiance, effet de l'ajout de nutriments, nécessité de stériliser les copeaux, etc. Sur les

plusieurs centaines d'espèces et de souches de champignons à pourriture blanche examinées jusqu'à présent, le *Ceriporiopsis subvermispora* s'est révélé le mieux adapté tant aux espèces de feuillus qu'à celles de résineux. Les récents travaux de recherche axés sur la commercialisation ont débouché sur les enseignements suivants :

- un bref étuvage des copeaux à pression atmosphérique (pendant seulement 15 secondes) suffit à donner au champignon de biopulpage un avantage compétitif par rapport aux micro-organismes indigènes, et ce même dans le cas de copeaux fortement contaminés ;
- on peut considérablement réduire la quantité (coût) de l'inoculum fongique en le complétant d'un nutriment relativement bon marché, le « corn steep » ;
- on peut contrôler la température et l'humidité de la pile de copeaux par aération forcée au moyen d'air conditionné, ce qui élimine une quantité considérable de chaleur métabolique fongique.

On a testé avec succès à des échelles de plus en plus grandes une méthode pour décontaminer les surfaces des copeaux de bois, refroidir les copeaux après leur étuvage, leur inoculer le champignon de façon continue et faire baisser la chaleur de la pile. En octobre 1996, une expérience a été menée par le FPL à l'air libre sur une pile de copeaux de 50 tonnes (poids sec) pour tester cette méthode. Les résultats obtenus se sont avérés équivalents à ceux des expériences en laboratoire. En juillet 1997, le FLP a réalisé avec succès une autre expérience à l'air libre sur une pile de 50 tonnes (poids sec), dont les copeaux ont été raffinés dans une fabrique de pâte à papier thermomécanique du Wisconsin.

Par ailleurs, une évaluation économique a été conduite sur une papeterie thermomécanique produisant 600 tonnes de pâte à papier par jour. La durée du traitement fongique était de deux semaines pour une pile à géométrie plate dans des conditions climatiques septentrionales. Les coûts d'équipement induits par l'incorporation de cette technologie de biopulpage dans une papeterie représentent selon les estimations entre 5 et 7 millions de dollars. La diminution de 30 pour cent de la consommation d'électricité peut permettre d'économiser 10 dollars par tonne de pâte, soit une économie annuelle de 2 millions de dollars. Compte tenu des coûts d'équipement estimés, la période d'amortissement est donc de deux à trois ans. Dans les papeteries où le raffinage est le facteur limitant, la réduction des besoins en énergie peut se traduire par une hausse de la production de plus de 30 pour cent si le raffinage se poursuit à consommation électrique totale constante. Or une augmentation de 20 pour cent de la production entraîne des économies de 55 dollars par tonne de pâte, soit 12 millions de dollars par an. Grâce à cette amélioration, la période d'amortissement de la technologie descend à six mois environ. Enfin, si on remplace 5 pour cent de la pâte kraft par des pâtes biomécaniques en mélange, des économies supplémentaires de plus de 13 dollars peuvent être réalisées sur chaque tonne de pâte.

Par l'intermédiaire de sa filiale Biopulping International, Inc., de Madison (Wisconsin), la société Weaver Industries, Inc., de Fresno (Californie) est devenue le numéro un de la commercialisation de la technologie du biopulpage. Elle s'efforce de promouvoir cette technologie à l'échelle mondiale et a développé à cet effet un vaste programme technologique qui englobe des accords de licence de brevet, la fourniture de l'inoculum fongique, la conception et la fourniture des équipements appropriés et, surtout, le savoir-faire technique.

Des études menées principalement aux États-Unis, en Afrique du Sud, au Brésil, en Autriche et en Inde laissent à penser que le traitement fongique préalable est efficace sur les végétaux non ligneux, et qu'il apporte également un plus aux procédés de mise en pâte de type kraft et au bisulfite, ainsi qu'à la production de pâtes en phase organique (« organosolv ») et pour transformation chimique.

Problèmes liés à la résine

La résine est un mélange de matières hydrophobes que l'on trouve dans bon nombre d'essences de bois. Selon l'essence et la saison, elle peut représenter entre 2 et 8 pour cent environ du poids total du bois. La résine pose un certain nombre de problèmes dans la fabrication de pâtes et papiers : dépôts sur les surfaces carrelées et métalliques, obturation des dispositifs de purge, décoloration des

feutres, déchirures et autres défauts du papier, immobilisation des machines pour nettoyage, etc. Pour lutter contre ces problèmes, plusieurs méthodes sont traditionnellement employées : on laisse sécher le bois naturellement avant la mise en pâte ou on recourt, dans le cadre du procédé de fabrication de la pâte ou du papier, à l'adsorption et la dispersion des particules de résine au moyen de substances chimiques, en accompagnant le processus par l'ajout de talc fin, de dispersants et d'autres types de substances chimiques.

Au cours des dix dernières années environ, deux méthodes biotechnologiques ont été développées indépendamment l'une de l'autre et sont aujourd'hui utilisées à l'échelle industrielle. A la fin des années 80, des scientifiques japonais ont découvert que le traitement des pâtes mécaniques au moyen de lipases, qui catalysent l'hydrolyse des triglycérides, permettait de diminuer sensiblement les problèmes liés à la résine. Au début des années 90, la société Sandoz Chemicals Corporation aux États-Unis (aujourd'hui rebaptisée Clariant Corporation) a lancé un nouveau produit de lutte contre la résine dans les copeaux de bois à pâte appelé Cartapip™. Il s'agit d'un inoculum fongique de l'ascomyète *Ophiostoma piliferum*. Une suspension aqueuse épaisse contenant les spores fongiques est pulvérisée sur les copeaux de bois lors de la phase d'empilement avant la mise en pâte. Le champignon envahit les cellules ligneuses et décompose la résine. La résine, y compris les acides toxiques qu'elle contient, peut également être métabolisée de façon assez efficace par les champignons qui décomposent la lignine, d'où un avantage supplémentaire.

Améliorations ou modifications apportées aux fibres

La structure et la composition chimique des surfaces des fibres de pâte sont d'une importance capitale pour la résistance du papier et plusieurs autres propriétés. Étant donné que les pâtes mécaniques permettent un rendement supérieur aux pâtes chimiques, elles ont suscité un intérêt croissant. Parfois, on ajoute des pâtes chimiques aux pâtes mécaniques pour leur conférer une plus grande résistance ou d'autres qualités. L'amélioration des propriétés des fibres de pâte mécanique peut permettre de réduire ou supprimer l'utilisation de pâtes chimiques.

Des enzymes ont été employées pour améliorer les propriétés physiques des fibres et pourraient trouver à l'avenir une application à l'échelle industrielle. Ainsi, les cellulases peuvent améliorer la fibrillation de la pâte et ainsi renforcer la résistance du papier. Elles peuvent diminuer la taille des fibres, accroître la densité du papier et le rendre plus lisse. Toutefois, elles peuvent également avoir pour effet de réduire la viscosité et doivent donc être utilisées avec prudence. Les préparations à base de xylanase se sont également révélées capables d'améliorer la fibrillation de la pâte et le liage des fibres. Concernant les fibres recyclées, le rythme d'égouttage de l'eau sur la machine à papier suscite des préoccupations croissantes. En effet, la vitesse de fonctionnement de la machine à papier dépend en partie du rythme d'égouttage de l'eau au niveau du matelas de fibres. Comme ce rythme est généralement plus lent pour les fibres recyclées que pour les fibres vierges, le débit de la machine à papier baisse en proportion de la teneur en fibres recyclées. On a cependant découvert que les cellulases et les hémicellulases peuvent accroître le rythme d'égouttage pour les fibres recyclées. Les essais pilotes et ceux menés à l'échelle de papeteries ont débouché sur la commercialisation de ces enzymes comme aides à l'égouttage. À l'avenir, d'autres procédés à base d'enzymes pourraient rendre plus propre et plus efficace la transformation des pâtes et papiers.

Pour améliorer la qualité du papier, on utilise parfois des enzymes qui modifient l'amidon. Ce procédé est plus propre que celui de la modification chimique (par oxydation), dans la mesure où il consomme moins d'énergie et produit moins de déchets. L'application d'amidons modifiés à l'aide d'enzymes dans la partie humide du processus (presse encolleuse) concerne environ 10 pour cent de la production de papier.

Désencrage

Les encres à base d'huile, comme celles des journaux et magazines, sont traditionnellement dégradées à l'aide de soude caustique, de silicates et de peroxydes. Toutefois, les méthodes de désencrage classiques ne permettent plus d'obtenir une pâte de haute qualité du fait de l'utilisation

de plus en plus fréquente de papier couché et de procédés d'impression laser ou xérogaphique faisant appel à de nouveaux types d'encre qui contiennent des polymères synthétiques. Les installations de recyclage doivent par conséquent faire de plus en plus appel à des systèmes mécaniques qui décomposent les plus grandes particules autres que l'encre afin d'autoriser leur récupération par flottation ou par lavage. Des techniques enzymatiques capables de désencrer tous les types de papier recyclé ont récemment été mises au point et commercialisées.

Blanchiment des pâtes kraft

Le procédé kraft représente la plus grosse part de la production mondiale de pâtes. La mise en pâte kraft décompose et élimine la majeure partie de la lignine sans endommager gravement la cellulose. Les pâtes kraft se caractérisent par une couleur brune qu'il convient d'éliminer par blanchiment avant la fabrication d'ouvrages imprimés, de papiers d'écriture ou d'autres produits pour lesquels l'apparence est importante. Les unités de blanchiment de pâtes kraft emploient à cette fin de nombreuses substances chimiques et séquences de traitement différentes. Les fabricants de pâtes ont traditionnellement eu recours à la chloration, mais face à l'opposition des consommateurs et au renforcement des réglementations d'environnement concernant le blanchiment au chlore, ils se tournent aujourd'hui de plus en plus vers d'autres solutions : emploi d'autres substances chimiques de blanchiment (dioxyde de chlore, oxygène, ozone et peroxyde), allongement de la phase de mise en pâte (pour abaisser la teneur en lignine de la pâte et réduire les besoins en produits chimiques de blanchiment) et autres modifications des procédés. Toutefois, certaines de ces méthodes présentent des inconvénients par rapport au procédé de chloration, à savoir des coûts plus élevés ou un risque de baisse du rendement et de la résistance.

Une nouvelle méthode de blanchiment des pâtes de bois a été développée par Haifa Technion en Israël et testée dans une grande papeterie. Ce procédé s'appuie essentiellement sur une nouvelle enzyme mieux adaptée aux températures et aux pH rencontrés dans le cadre de la transformation des pâtes. Selon les informations publiées, son coût serait identique à celui des méthodes traditionnelles à forte intensité de chlore. Cet exemple illustre le processus continu d'amélioration qui caractérise nombre de procédés biotechnologiques. En l'occurrence, on a surmonté les inconvénients des enzymes conventionnelles pour faire franchir un nouveau palier à la compétitivité du procédé fondé sur la biotechnologie.

Des études menées en Finlande montrent que les hémicellulases (principalement les xylanases) améliorent le blanchiment des pâtes. Ces enzymes trouvent aujourd'hui une utilisation à l'échelle industrielle en Scandinavie, au Canada, aux États-Unis et au Chili. Le traitement des pâtes kraft au moyen de xylanases permet de réduire sensiblement la consommation de substances chimiques presque sans baisse du rendement ou de la qualité. Le blanchiment biologique par xylanases des pâtes acides au bisulfite offre également des perspectives prometteuses, avec notamment des économies sur les produits chimiques pouvant atteindre 51 pour cent. Actuellement, la recherche s'oriente vers la découverte ou la modification d'enzymes plus résistantes aux conditions de pH et de température.

Les ligninases telles que les laccases et peroxydases mangano-dépendantes présentent également des possibilités en matière de blanchiment des pâtes, bien qu'elles ne soient pas employées à l'échelle industrielle. Ces deux enzymes peuvent avoir une action de délignification plus importante que la xylanase, mais certains facteurs font encore obstacle à leur utilisation efficace et économe. Pour l'heure, il n'existe aucune source commerciale à grande échelle, de sorte qu'on ne connaît pas encore leur coût. Actuellement, on recherche le moyen de les produire à un prix suffisamment bas pour rendre la technologie intéressante d'un point de vue économique. Par ailleurs, il est possible que la modification génétique d'un champignon en vue de produire *in situ* le mélange voulu d'enzymes et de leur cosubstrat devienne une solution plus efficace par rapport à son coût que la production et l'application d'enzymes dans le cadre d'étapes séparées.

Réduction des composés organochlorés dans les effluents des unités de blanchiment

Depuis deux décennies, les composés organochlorés sont source de préoccupation dans l'industrie des pâtes et papiers. Ces composés sont produits principalement par les réactions entre les résidus de lignine présents dans les fibres de bois et le chlore ou les dérivés du chlore servant au blanchiment. Certains d'entre eux sont toxiques, mutagènes et persistants et leur bio-accumulation porte atteinte aux systèmes biologiques. Dans un premier temps, l'industrie des pâtes et papiers a tenté de résoudre ce problème en améliorant les méthodes d'épuration des effluents. De nombreuses méthodes physico-chimiques ont été employées à cette fin dans les unités de blanchiment : précipitation à l'aide de chaux, d'ions métalliques et d'alun et de coagulants polymériques de synthèse; adsorption sur charbon actif, argiles naturelles et adsorbants polymériques; techniques à base de membranes; filtration rapide dans le sol; exposition aux rayonnements UV; et oxydation au moyen d'oxygène, de dioxyde de soufre, de peroxyde d'hydrogène et d'hypochlorite de sodium. Les problèmes posés par ces méthodes d'épuration physico-chimiques sont liés au coût et à la fiabilité. A l'heure actuelle, la R-D dans ce domaine est consacrée en priorité à l'amélioration du procédé de mise en pâte afin de diminuer la formation de sous-produits indésirables.

Les méthodes biotechnologiques devraient permettre d'éliminer ou d'atténuer les problèmes rencontrés avec les méthodes physico-chimiques. On sait que les traitements biologiques à base de bactéries ou de champignons sont efficaces pour réduire la demande biologique en oxygène (DBO), la demande chimique en oxygène (DCO) et la toxicité des fabriques de pâte kraft. Il semble en outre que certaines enzymes, et en premier lieu les peroxydases, les laccases, etc., soient capables d'éliminer les couleurs et les composés organohalogénés adsorbables des effluents des papeteries. De nombreux facteurs sont à prendre en compte dans le choix d'un procédé de blanchiment/traitement industriel efficace et répondant à toutes les normes d'environnement. Ces procédés ne sont pas employés à l'échelle industrielle.

Parmi les premières techniques biologiques mises au point, les procédés de traitement des déchets sont les plus répandus. Ils se fondent en grande partie sur les activités de décomposition exercées par des mélanges de micro-organismes aérobies et anaérobies, notamment des bactéries. Les progrès réalisés dans les applications d'épuration des eaux usées ont concerné davantage les aspects techniques que les aspects biologiques. Toutefois, avec le renforcement des mesures de protection de l'environnement (à l'image des « Cluster Rules » définies par l'Agence pour la protection de l'environnement des États-Unis), il est probable que les innovations dans ce domaine porteront tout autant sur les aspects biologiques. Il apparaît qu'à long terme, la seule solution possible passe par le développement de technologies permettant aux papeteries de fonctionner sans aucun effluent.

A l'heure actuelle, on parvient à une production nettement plus propre en intégrant l'épuration de l'eau aux procédés et en réutilisant dans la même unité de production les eaux industrielles épurées par voie biologique. Environ 10 à 20 pour cent des producteurs européens de papier recourent à cette forme de réutilisation qui élimine tout rejet d'eaux usées (Hooijmeijer, communication personnelle). Aux États-Unis et au Japon, les fabricants de papier sont beaucoup moins nombreux à avoir opté pour cette solution.

Problèmes liés aux biofilms

Les biofilms (pellicules) constituent un problème important pour les papeteries. Ils bouchent les toiles, les conduits et les écoulements et contaminent le produit lui-même, au point qu'il prend parfois une mauvaise coloration. Pour y remédier, on utilise principalement des biocides dont certains peuvent être toxiques pour l'homme et d'autres formes de vie. Une part considérable de la recherche s'est attachée à trouver d'autres méthodes sans danger pour l'environnement. Étant donné que les biofilms se composent de bactéries et de champignons enchâssés dans une matrice de polysaccharides extracellulaires, on a étudié les enzymes qui hydrolysent les polymères. Au moins un produit à base d'enzymes, une lévulanase baptisée ED-1, est utilisé à l'échelle industrielle dans les papeteries des États-Unis, de Scandinavie, du Royaume-Uni et du Japon. Une autre méthode prometteuse consiste à introduire des micro-organismes qui ne forment pas de biofilm et qui prennent le dessus sur les autres

au niveau des substrats. A terme, il est probable que l'on utilisera une combinaison d'enzymes, de micro-organismes inoffensifs et de dispersants pour réduire ou éliminer le recours aux biocides dans les papeteries.

Évolutions à venir

L'exposé qui précède montre clairement que la biotechnologie a trouvé plusieurs applications industrielles dans le secteur des pâtes et papiers et que plusieurs autres sont en cours de développement. Chaque jour ou presque apporte son lot de nouvelles découvertes fondamentales, et il est probable que certaines pistes aujourd'hui en cours d'exploration déboucheront demain sur de nouvelles applications majeures. Les développements intervenus dans l'étude des biocatalyseurs sont à cet égard exemplaires. Les enzymes d'aujourd'hui seront remplacées par des enzymes naturelles plus résistantes dans le cadre des procédés industriels, lesquelles céderont à leur tour la place à d'autres, spécialement conçues pour des applications particulières. En outre, on mettra sans doute au point pour un grand nombre d'applications différentes des catalyseurs fondés sur des sites à activité enzymatique, mais non limités par la fragilité de la structure protéique. L'emploi de micro-organismes entiers dans la transformation du bois et des pâtes deviendra probablement de plus en plus attrayant; ainsi, on a pu constater que le biopulpage recelait un potentiel important même sans recourir à l'amélioration des souches par reproduction classique ou par génie génétique.

Ne pas mentionner l'énorme impact qu'exercera la biotechnologie sur la production et la qualité des arbres destinés à l'industrie des pâtes et papiers et à d'autres usages serait un grave oubli. La puissance de la biotechnologie continuera de profiter à la production et à l'amélioration des arbres. Le clonage produira assurément des lignées supérieures, comme c'est déjà le cas pour les eucalyptus, et des semences artificielles seront produites à partir des individus présentant les caractéristiques voulues. Les arbres seront génétiquement manipulés pour modifier la lignine, réduire leur teneur en lignine, accélérer leur floraison, améliorer la morphologie et la forme de leurs fibres, développer leur résistance aux insectes, agents pathogènes, herbicides et polluants, et permettre l'obtention de produits de valeur. En fait, il est probable que certains d'entre eux seront spécialement modifiés génétiquement pour faciliter le traitement par voie biologique.

Annexe 2.3

MÉTAUX ET MINÉRAUX**BIOLIXIVIATION/OXYDATION BIOLOGIQUE DE MINÉRAUX****Oxydation biologique en cuve à agitation dans la mine de Youanmi en Australie-Occidentale**

Détenue et exploitée par Gold Mines of Australia, la mine de Youanmi utilise les bactéries thermophiles de BacTech (Australia) Limited à 50-52 °C pour traiter chaque jour 120 tonnes de concentré de flottation contenant 60 grammes d'or par tonne. L'or est renfermé dans une arsénopyrite qui est dégradée par les bactéries. Le taux de récupération de l'or varie entre 95 et 98 pour cent. L'installation d'oxydation biologique et les circuits connexes de lavage et de neutralisation ont représenté un coût d'équipement de 3.89 millions de dollars. Le coût d'exploitation s'établit à 37 dollars par tonne de concentré traité.

Biolixiviation en tas des minerais de sulfure de cuivre à Quebrada Blanca (Chili)

Exploitée par la société Cominco Limited, la mine Compania Minera Quebrada Blanca est située à 4 800 mètres au-dessus du niveau de la mer dans les Andes, au nord du Chili. Elle traite 17 300 tonnes par jour de minerai de chalcosite (Cu_2S) par biolixiviation en tas. Le minerai est broyé en morceaux de 6 mm, puis empilé en rangées, dont les bactéries extraient 80 à 82 pour cent du cuivre. Le cuivre ainsi libéré passe dans la solution de lixiviation, dont le traitement par extraction par solvant et extraction électrolytique permet de produire 75 000 tonnes de cuivre électrolytique par an. Il s'agit de la plus grande unité autonome de biolixiviation en tas de la planète. Elle ne rejette aucun effluent nécessitant un traitement. Elle représente un coût d'équipement total de 360 millions de dollars, qui englobe les investissements de développement et d'infrastructure de la mine. Le coût d'exploitation est inférieur à 1.10 dollar par kilogramme de cuivre électrolytique.

«L'oxydation biologique» des minéraux désigne un procédé de traitement préalable qui, au moyen des mêmes bactéries que celles utilisées dans la biolixiviation, catalyse la décomposition des sulfures minéraux, généralement des pyrites ou arsénopyrites, qui renferment ou incluent de l'or, de l'argent ou les deux. Dans le cadre de ce procédé, les composants de valeur restent en phase solide et la solution est éliminée. Les solides sont lavés à l'eau, neutralisés à la chaux et traités avec une solution de cyanure de sodium dilué ou d'un autre lixiviant pour solubiliser les métaux précieux.

La biolixiviation et l'oxydation biologique des minéraux trouvent une application dans les domaines suivants :

- Réacteurs ventilés à agitation servant au traitement de concentrés de minerais. Les réacteurs sont des cuves en acier inoxydable et le procédé se compose d'au moins trois étapes. Dans la première, plusieurs cuves sont disposées en parallèle. On injecte de l'air dans les cuves, qui sont toutes équipées d'un agitateur servant à faire éclater les bulles d'air afin de favoriser une suspension uniforme des solides. L'oxydation des pyrites produisant de la chaleur, les réacteurs sont refroidis par chemise d'eau ou refroidisseur tubulaire.
- Traitement des minerais par biolixiviation en tas. Les minerais sont concassés et empilés en rangées, et la lixiviation des pyrites est obtenue au moyen d'une solution ferrique acide contenant les bactéries. Dans le cas des minerais de métaux communs, le produit de valeur se trouve dans la solution de lixiviation évacuée. Dans celui des métaux précieux, le minerai ayant subi l'oxydation biologique est lavé à l'eau et mélangé avec de la chaux, puis remis en tas pour l'application d'une solution de cyanure dilué permettant d'extraire le métal.

- Traitement des minerais de métaux communs dans le sol. Ce procédé est semblable à celui de biolixiviation en tas, si ce n'est que le minerai est fracturé *in situ* à l'aide d'explosifs avant l'application de la solution de lixiviation et des bactéries par percolation. Les solutions contenant le métal de valeur sont recueillies à la base du gisement de minerai et ramenées par pompage à la surface, où le métal peut être récupéré.

Assainissement biologique et récupération de métaux

Certains micro-organismes immobilisent, mobilisent ou transforment les métaux par des réactions de précipitation extracellulaires, par accumulation intracellulaire, par des réactions d'oxydation et de réduction, par méthylation et déméthylation, ainsi que par agglutination et complexation extracellulaires. Les procédés suivants à base de micro-organismes ont fait l'objet de vastes essais pilotes ou sont employés à l'échelle industrielle :

- La précipitation extracellulaire, qui utilise les bactéries sulfato-réductrices pour produire de l'acide sulfhydrique afin de précipiter les métaux lourds sous forme de sulfures insolubles. Les sulfures métalliques sont récupérés. Les organismes produisent également des ions bicarbonate qui contribuent à neutraliser les flux de déchets acides.
- L'agglutination et la complexation extracellulaires, qui utilisent des micro-organismes pour concentrer les métaux à l'extérieur de la cellule microbienne. Vivants ou non, les micro-organismes possèdent à la surface des cellules quantités de groupes fonctionnels qui se lient aux ions métalliques. Ces groupes fonctionnels confèrent aux micro-organismes une charge négative nette. Les ions métalliques chargés positivement se lient à la paroi cellulaire des micro-organismes par des réactions de type adsorption, par réduction du métal, par des réactions de complexation et par des réactions de précipitation. Les métaux peuvent alors être détachés des micro-organismes par des agents complexants ou acides et être récupérés en vue de leur réutilisation.

Le tableau 2.1 de l'annexe donne une présentation synoptique des principales installations qui emploient avec succès des réacteurs biologiques (ainsi que certaines en cours de développement) pour soumettre les concentrés d'or à un traitement préalable avant la récupération de l'or par cyanuration. Il indique également la date de mise en service, les éventuels agrandissements et certaines caractéristiques de capacité des installations. Les différences de rapports entre alimentation en minéraux et quantité de soufre oxydé traduisent les différences de composition des minéraux.

Récupération de métaux

La fabrique de zinc de Budel-Dorplein aux Pays-Bas exploite le plus important projet industriel de réduction des sulfates par des bactéries pour éliminer les polluants métalliques des eaux souterraines. Mise en service en 1992, cette unité est conçue pour traiter 300 m³/h d'effluents contenant 100 mg/l de zinc, 1 mg/l de cadmium et 1 000 mg/l de sulfate. Développé à l'échelle industrielle par les sociétés Paques Biosystems International B.V. de Balk (Pays-Bas) et Paques, Inc., d'Exton (Pennsylvanie), le procédé de traitement microbien permet de ramener les rejets en dessous de 0.3 mg/l de zinc, 0.01 mg/l de cadmium et 200 mg/l de sulfate. Les sulfures métalliques, précipités par le H₂S, et le soufre élémentaire, produit par l'oxydation microbiologique du surplus de H₂S, sont réintroduits dans le four de fusion du zinc où les métaux sont récupérés, et le soufre est converti en acide sulfurique dans l'usine d'acide. Le coût total (produits chimiques, énergie et amortissement) d'une installation d'élimination microbiologique des sulfates et des métaux dépend des caractéristiques du flux de déchets et des critères de rejet. A titre indicatif, on estime à 330 dollars par tonne de sulfate le coût d'une unité servant à éliminer 10 000 tonnes de sulfate par an.

PÉNÉTRATION DU MARCHÉ ET TENDANCES

Partout dans le monde, les procédés de biolixiviation et d'oxydation biologique sont aujourd'hui évalués au même titre que les autres technologies compétitives dans quasiment tous les nouveaux

Annexe : Tableau 2.1. **Installations à réacteurs biologiques pour le traitement préalable de concentrés d'or**

| Lieu | Période d'exploitation | Minéraux (tpj) | Soufre (tpj) | Capacité totale (m ³) |
|--|------------------------|----------------|--------------|-----------------------------------|
| Fairview, Afrique du Sud ¹ | 1986-91 | 10 | | |
| | 1991-aujourd'hui | 35 | 7 | 900 |
| São Bento, Brésil ² | 1990-95 | 150 | 24 | |
| | 1995-aujourd'hui | 110 | | 1 160 |
| Harbour Lights, Australie ³ | 1991-93 | 40 | | |
| Wiluna, Australie | 1993-96 | 115 | | |
| | 1996-aujourd'hui | 152 | 36 | 4 240 |
| Youanmi, Australie ⁴ | 1994-aujourd'hui | 120 | | -3 000 |
| Sansu, Ashanti, Ghana ⁵ | 1994-95 | 720 | | |
| | 1995-aujourd'hui | 1 152 | 127 | 21 360 |
| Tamboraque, Pérou ⁶ | - | 60 | 18 | 1 572 |
| Amantaytu, Ouzbékistan ⁷ | - | 1 100 | 275 | 23 376 |

Tpj = tonnes par jour.

1. La réussite de l'essai pilote mené entre 1984 et 1986 à Fairview a débouché sur la mise en service du premier réacteur biologique industriel, qui est venu remplacer le four de grillage plus traditionnel utilisé dans l'usine.
2. L'agrandissement du site de São Bento, où le concentré est en partie oxydé par voie biologique avant d'être passé à l'autoclave pour une oxydation sous pression, a représenté l'étape intermédiaire dans la mise en place prévue de quatre réacteurs. L'extension des capacités des bioréacteurs présentait un meilleur rapport coût-efficacité que la solution consistant à accroître les capacités d'oxydation sous pression. La réduction de la quantité traitée s'explique par une modification de conception apportée au procédé pour permettre une oxydation biologique plus complète du sulfure (70 pour cent contre une valeur nominale de 30 pour cent).
3. Cette installation a eu une durée de vie courte parce qu'elle répondait au besoin de traitement d'un stock limité de concentré.
4. Cette installation utilise les bactéries moyennement thermophiles de Bactech à environ 50° C. Elle est la seule parmi les unités de traitement de minerais d'or répertoriées dans ce tableau à ne pas employer la technologie BIOX® développée par Gencor (Billiton SA Ltd. Process Research) en Afrique du Sud.
5. Aujourd'hui, cette unité compte quatre modules de six réacteurs chacun. Le concentré était auparavant destiné à un four à grillage.
6. En construction.
7. En attente d'aides financières.

Source : Norris, communication personnelle.

projets d'extraction minière. Ils sont commercialisés par plusieurs sociétés de technologie et une poignée de consultants spécialisés, et les systèmes sont conçus et mis au point par un certain nombre de grandes entreprises mondiales d'ingénierie. Dans toutes les grandes expositions et conférences internationales sur l'extraction minière, ces technologies font l'objet de documents techniques ou d'exposés. Désireuses de comprendre leur fonctionnement et de les appliquer, de nombreuses entreprises minières s'attachent les services de consultants ou de sociétés d'étude qui les renseignent sur les procédés et évaluent les possibilités d'application dans toutes les activités de l'entreprise.

La réduction biologique des sulfates aux fins de récupération de métaux est une technologie moins connue. Elle est commercialisée par une seule entreprise, à l'échelle mondiale, à l'aide de présentations techniques et de visites aux clients potentiels. Des accords de coopération avec d'autres sociétés de technologie sont à l'étude, ce qui devrait entraîner une intensification des efforts de commercialisation. Étant donné que de nombreuses sociétés minières se sont engagées à se montrer plus réceptives aux applications biotechnologiques, les ventes de la technologie de réduction des sulfates devraient assurément progresser.

ACTION DES POUVOIRS PUBLICS

Les politiques en place n'affectent pas de manière sensible la biolixiviation/oxydation biologique, ni la réduction des sulfates aux fins de récupération de métaux. Le recours au génie génétique dans le cadre de la biolixiviation fait actuellement l'objet d'études à un niveau très fondamental, mais il est probable que les applications industrielles ne verront pas le jour avant au moins une décennie.

ANALYSE ÉCONOMIQUE

Les réacteurs biologiques fermés sont utilisés pour la récupération de métaux, en particulier l'or. Toutefois, comme le chiffre d'affaires (ventes associées à la biotechnologie – VAB – définies dans les premier et deuxième chapitres) réalisé par l'industrie de la biotechnologie dans ce secteur est très faible, il est impossible d'évaluer pour l'heure leur pénétration du marché (Abbott, 1996). Quelque 25 entreprises emploient aujourd'hui ce procédé biotechnologique pour produire de l'or. Cela étant, il apparaît de manière générale que les minéraux et les métaux ne se prêtent pas à la conversion biologique; par conséquent, les possibilités d'application de procédés biotechnologiques seront toujours limitées comparées à celles des procédés physico-chimiques. La biotechnologie est appelée à jouer un rôle dans le domaine des technologies en bout de chaîne, qui ne sont pas considérées comme faisant partie des technologies propres à moins de permettre une réutilisation intégrée de l'eau. Pour l'instant, ni la métallurgie, ni l'industrie minière n'y sont parvenues à grande échelle.

LES ASPECTS ÉCONOMIQUES DE LA BIOLIXIVIATION

A l'heure actuelle, quelque 25 entreprises recourent à la biotechnologie pour la récupération d'or à partir de concentrés de minerai. Une étude a comparé du point de vue de la compétitivité le fonctionnement d'une unité biotechnologique à celui des unités physico-chimiques représentant les deux autres principales solutions (McNulty et Thompson, 1990). On peut en tirer certaines indications préliminaires quant aux avantages pour l'environnement.

L'or n'a cessé de susciter l'intérêt depuis la libéralisation de son marché au milieu des années 70. Sa valeur est supérieure à son coût de production. Aux États-Unis, la production d'or est passée de 1 million d'onces troy à 5 millions en 1987 et poursuit depuis sa progression.

On emploie trois grandes techniques pour l'oxydation préalable des minerais d'or non amalgamables : grillage, oxydation sous pression d'eau et oxydation biologique. Le grillage des minerais a certaines incidences négatives sur l'environnement, notamment une forte consommation d'énergie et des émissions gazeuses qui imposent le recours à des équipements d'épuration (avec à la clé des coûts d'investissement et d'exploitation élevés). En outre, le rendement de la lixiviation au cyanure qui suit s'établit dans certains cas à seulement 80 pour cent. L'oxydation sous pression est réalisée à des températures de 180 à 210 °C, d'où une consommation d'énergie élevée et un investissement coûteux en matériel haute pression. En revanche, la phase de cyanuration présente un rendement élevé, généralement supérieur à 90 pour cent. Enfin, le procédé biotechnologique n'impose pas d'investissements ou de coûts d'exploitation importants, car il n'exige ni température élevée ni haute pression. Il est donc avantageux pour l'environnement puisqu'il limite les émissions de dioxyde de carbone, d'autant que les bactéries employées consomment le dioxyde de carbone pour produire de la biomasse. Une certaine quantité d'énergie est toutefois nécessaire pour le refroidissement. En revanche, le procédé biotechnologique implique des temps d'immobilisation beaucoup plus longs dans le réacteur. Les tableaux 2.2 et 2.3 de l'annexe comparent les coûts respectifs de ces trois technologies d'oxydation préalable.

Annexe : Tableau 2.2. **Estimation des coûts d'exploitation et d'investissement des installations de traitement préalable présentant une capacité quotidienne de 100 tonnes de minerais d'or non amalgamable**

| Poste | Grillage | Oxydation sous pression | Oxydation bactérienne |
|---|----------|-------------------------|-----------------------|
| Coûts d'investissement (en milliers de dollars) | 4 370 | 3 380 | 2 490 |
| Coût d'exploitation total (en milliers de dollars par an) | 1 580 | 1 440 | 1 510 |
| Coût par tonne de concentré (en dollars) | 45.10 | 41.10 | 43.10 |
| Coût par tonne de minerai (en dollars) | 4.50 | 4.10 | 4.30 |

Source : McNulty et Thompson, 1990.

Annexe : Tableau 2.3. **Comparaison économique de trois unités de récupération de métaux**

| Poste | Grillage | Oxydation sous pression | Oxydation bactérienne |
|--|----------|-------------------------|-----------------------|
| Coûts d'investissement (en milliers de dollars) | 16 800 | 15 600 | 14 430 |
| Coût d'exploitation total (en dollars par tonne) | 13.60 | 13.20 | 13.40 |

Source : McNulty et Thompson, 1990.

Comme le montrent les données présentées dans ces tableaux, les unités affinant l'or à partir de minerais non amalgamables présentent des coûts d'exploitation très proches quel que soit le procédé utilisé. En revanche, les coûts d'investissement semblent sensiblement moindres pour le procédé biotechnologique que pour les deux procédés physico-chimiques. Cela étant, le choix d'applications biotechnologiques n'est pas seulement une question de coûts, dans la mesure où le procédé biotechnologique n'est pas encore éprouvé et ne convient pas pour tous les minerais.

Annexe 4.1

MÉTHODOLOGIE DE L'ACV**DÉFINITION DE L'OBJECTIF ET DU CHAMP DE L'ÉTUDE**

Dans le cadre d'une ACV, la première tâche consiste à définir l'objectif et le champ de l'étude et de l'adapter à l'application prévue. Il importe de garder à l'esprit que le champ de l'étude doit être déterminé de façon à rendre possible la réalisation de l'objectif et de l'application prévue. Décrire avec précision les raisons qui motivent la conduite de l'ACV et les groupes cibles constitue la première priorité. En l'occurrence, l'objectif doit énoncer les questions auxquelles l'étude doit répondre, notamment pour que l'on puisse évaluer la nécessité et la pertinence de chaque étape de l'ACV à la lumière des informations qu'elle engendre. On peut se montrer plus exigeant vis-à-vis des ACV destinées à étayer un processus de prise de décision politique, sachant qu'elles peuvent avoir des conséquences d'une grande portée pour les secteurs économiques concernés, que vis-à-vis des analyses internes portant sur les carences d'une entreprise.

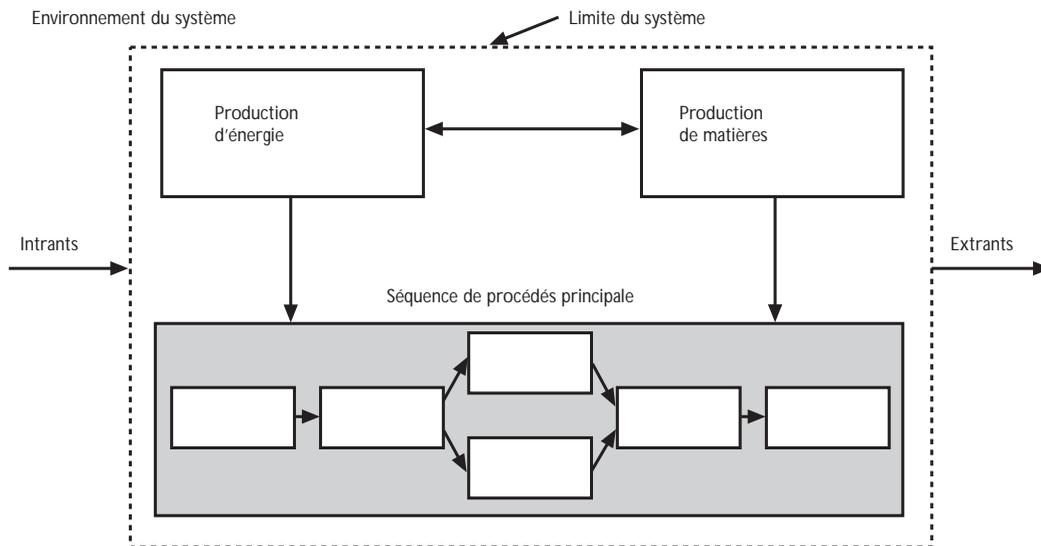
Pour donner une description claire et précise du système à étudier, il faut d'emblée préciser une série de définitions dont les plus importantes sont les suivantes :

- les fonctions du système et l'unité fonctionnelle;
- les limites du système;
- les procédures d'attribution;
- les types d'incidences à étudier;
- la méthode d'évaluation des incidences puis d'interprétation;
- les besoins de données;
- les hypothèses et leurs limites;
- le cas échéant, l'examen critique d'accompagnement;
- le cas échéant, le type et la structure du rapport d'ACV.

Ces définitions ne doivent pas être considérées comme statiques; elles peuvent au contraire être modifiées à tout moment en fonction des informations supplémentaires recueillies au cours de l'étude.

Une unité fonctionnelle est une mesure des performances du système étudié. Elle doit être clairement définie et mesurable : par exemple, 1 000 litres de lait conditionné et transporté, ou 1 m³ d'espace clos. L'unité fonctionnelle sert de référence pour l'ensemble des intrants et extrants. Elle établit l'équivalence fonctionnelle de deux systèmes à comparer et constitue donc un élément indispensable pour garantir la comparabilité des résultats. Par exemple, si les deux systèmes à comparer, A et B, remplissent respectivement les fonctions x et y, et que le système A remplit en outre la fonction z, cette dernière doit également être documentée. Une autre méthode consiste à ajouter au système B un dispositif qui remplit la fonction z.

Le terme «système de produit» désigne une combinaison de procédés, liés par des flux de matières et d'énergie, qui remplit une ou plusieurs fonctions prédéterminées. Les limites du système représentent l'interface entre le système de produit considéré et l'environnement ou d'autres systèmes de produit. Par conséquent, les limites du système déterminent les procédés qui doivent faire l'objet d'une ACV (figure 4.1 de l'annexe). Le système doit être modélisé de telle façon que les entrées et sorties au niveau des limites puissent être représentées sous forme de flux élémentaires, c'est-à-dire prélevées dans l'environnement sans traitement préalable ou mises au rebut sans traitement *a posteriori*.

◆ Annexe Figure 4.1. *Limites d'un système de produit pour une ACV*

Les limites du système dépendent de nombreux facteurs, en particulier l'application, le groupe cible, les hypothèses formulées, les critères de séparation, les données et les impératifs de coût. Sachant que ces limites peuvent considérablement influencer les résultats d'une ACV, il importe de décrire et de justifier les critères utilisés pour les déterminer. Le système doit être décrit de façon suffisamment claire et détaillée pour permettre à une tierce partie de reproduire l'inventaire.

La qualité des données compilées pour l'inventaire peut sensiblement affecter l'utilité d'une ACV. Des objectifs et du champ de l'étude découlent certains impératifs concernant la qualité des données. Ces impératifs s'appliquent à des aspects tant quantitatifs que qualitatifs et aux méthodes employées pour recueillir et traiter les données, comme :

- la couverture géographique, technique et temporelle ;
- l'exhaustivité, la précision et la représentativité ;
- le caractère non fiable et variable des informations ;
- la cohérence et la reproductibilité des méthodes utilisées dans l'ACV ;
- la reproductibilité des résultats par une tierce partie indépendante.

Il convient de décider dans quelle mesure l'ACV nécessite des données spécifiques, c'est-à-dire obtenues par enquête auprès d'entreprises employant des procédés ou itinéraires de transport définis, ou si les estimations ou les données générales issues des publications peuvent être considérées comme suffisantes. Dans la pratique, on utilise généralement une combinaison de données mesurées, calculées et estimées, et on accorde davantage de poids aux données spécifiques recueillies sur le terrain qu'aux données générales tirées des publications. Pour des raisons pratiques, il est toutefois rarement possible de mener des campagnes de mesure à grande échelle aux fins d'acquisition de données dans le cadre d'une ACV. On peut garantir la transparence en citant la source de toutes les données utilisées.

En ce qui concerne les procédés industriels, selon les normes techniques des installations, les données disponibles pour des procédés identiques présentent souvent d'importantes variations. Dans le cas d'études comparatives, notamment, le recours à différents types de données (par exemple, état actuel, optimum technique et valeurs moyennes internationales) peut se traduire par des divergences considérables dans les données et donc par des conclusions erronées.

Afin de mettre à jour leurs contradictions et leurs lacunes, les données recueillies doivent être soumises à une procédure de validation. Les bilans énergétiques et massiques et les analyses comparatives des facteurs d'émissions sont des outils adaptés à cet exercice. Cette procédure peut néanmoins poser certains problèmes dans le cas des procédés biotechnologiques, qui bien souvent présentent une certaine inconstance. En outre, les quantités qu'ils utilisent sont généralement petites et donc difficiles à déterminer.

Lorsque l'ACV est menée conjointement avec une entreprise industrielle, les données déjà disponibles peuvent constituer un point de départ appréciable. Souvent, des problèmes et des lacunes apparaissent au niveau des données sur les procédés extérieurs aux installations de l'entreprise. Ensuite, on doit fréquemment utiliser des données publiées sous certaines conditions visant à assurer leur protection (application de valeurs moyennes, par exemple). Malgré les efforts entrepris par différents organismes nationaux et internationaux, comme la *Society for Promotion of Life Cycle Assessment Development* (SPOLD), il y a un manque patent de données acceptables par tous.

Pour comparer des systèmes de produit, il convient de s'assurer de leur comparabilité, c'est-à-dire de la possibilité d'utiliser le même champ d'étude et les mêmes paramètres (unité fonctionnelle, limites du système, qualité des données, procédures d'attribution, critères d'évaluation des flux d'intrants et d'extrants, et critères pour l'étude d'impact). Les différences entre les systèmes doivent être recensées et déclarées. Si les comparaisons sont destinées à la publication, il est impératif d'effectuer la phase de l'étude d'impact conformément au projet de l'ISO (voir l'annexe 4.2). En outre, les méthodes appliquées doivent être examinées par un comité consultatif indépendant. Enfin, la plus grande prudence s'impose dans les affirmations non étayées par une étude d'impact, dans la mesure où les résultats de l'inventaire ne prouvent que rarement la supériorité indiscutable d'un système donné.

INVENTAIRE

L'inventaire consiste à recueillir des données sur les intrants et extrants pertinents : consommation d'énergie et de ressources, émissions dans les milieux de l'environnement (eau, sol, air). Le cas échéant, les données font ensuite l'objet d'une quantification mathématique. Si les objectifs des ACV correspondent, on peut formuler des interprétations à partir de ces données. L'analyse exhaustive du cycle de vie d'un produit doit prendre en compte non seulement les flux énergétiques et massiques liés à l'obtention des matières premières et aux procédés de production, mais également ceux qui ont trait au transport, à l'utilisation et à l'élimination du produit. Si on compare la production de produits homogènes, ce dernier groupe revêt généralement une importance moindre. Néanmoins, toute omission d'une phase du cycle de vie, d'un procédé ou d'une pollution doit être justifiée.

Pour déterminer ses intrants et ses extrants, le système doit être décomposé en procédés de production individuels (figure 4.2 de l'annexe).

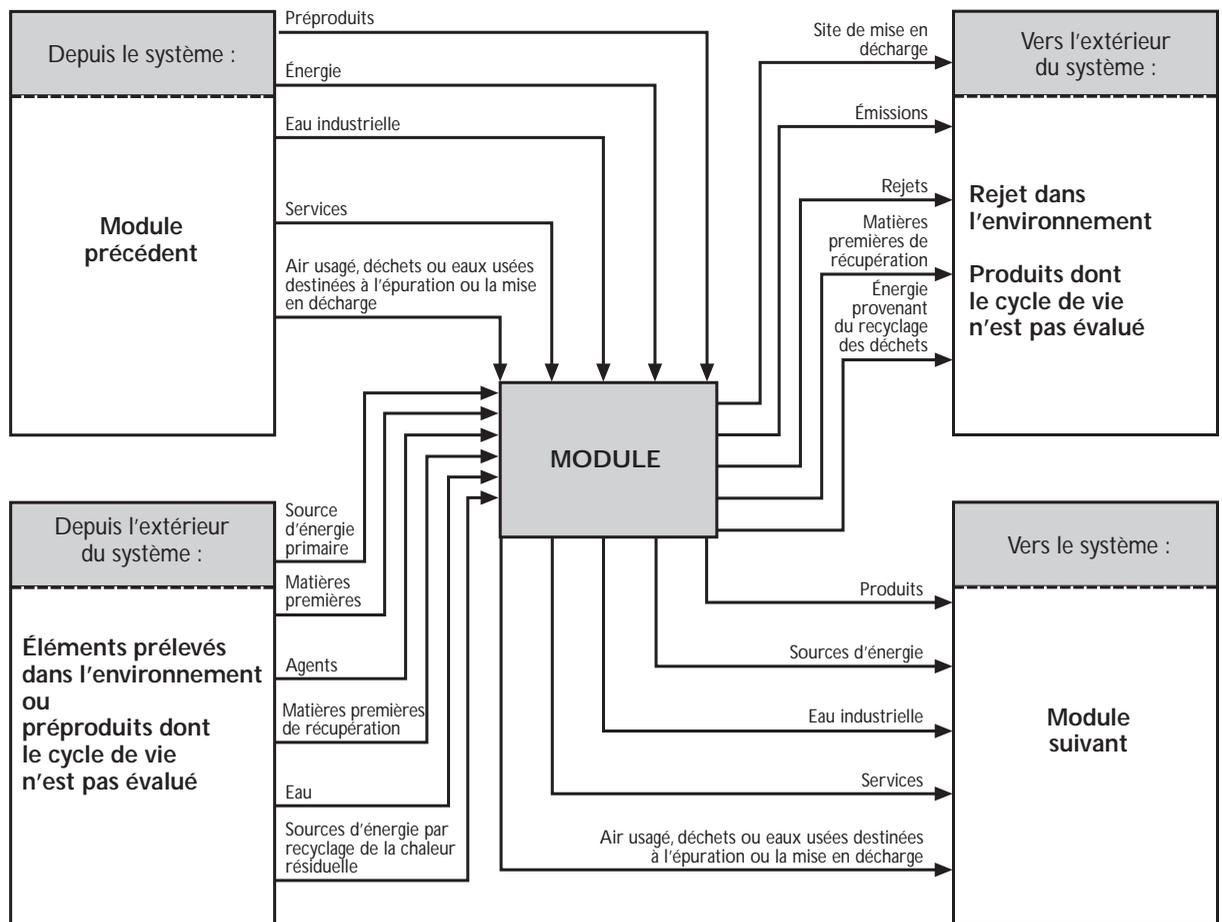
Dans la pratique, il arrive qu'on ne puisse pas différencier clairement la pollution provoquée par divers systèmes de produit, et ce pour plusieurs raisons. Dans ce cas, il est difficile d'attribuer les différents types de pollution aux divers systèmes.

La production simultanée de deux produits (A et B) ou plus par un seul procédé (production couplée) illustre ce cas de figure. En effet, le produit A n'est alors pas la cause unique de la pollution engendrée par le procédé, dans la mesure où le produit B profite également de ce dernier et possède une valeur marchande propre.

De même, dans un système servant à la production du produit A, les flux de matières ne quittent pas forcément le système sous forme de déchets, puisqu'ils peuvent être employés dans un système servant à produire le produit B (recyclage en circuit ouvert). Il en va de même si le système considéré conduisant au produit A utilise des produits recyclés provenant du système de production du produit C, qui est lui hors du champ de l'étude.

Dans les publications, ces aspects sont abordés sous des angles fondamentalement différents (Klöpper, 1996) : certaines se fondent sur des approches scientifiques exactes et incontestables,

◆ Annexe Figure 4.2. *Analyse de l'inventaire du cycle de vie*



Source : Projektgemeinschaft Lebenswegbilanzen, 1992.

indépendamment de leur praticabilité, tandis que d'autres emploient des règles simplifiées qui, bien que comportant une certaine part d'arbitraire, peuvent être appliquées même à des systèmes complexes.

L'approche scientifiquement exacte ayant la plus grande portée consiste à élargir le système A (que l'on étudie) au système B (et, le cas échéant, au système C). Dans le cas de systèmes complexes, cette procédure peut donner lieu à une telle multiplication des systèmes à étudier que l'ACV n'est plus praticable.

Pour obtenir des résultats simples mais plausibles, les critères suivants devraient être appliqués :

- exactitude mathématique, logique interne, pas de double comptage des incidences sur l'environnement ;
- faisabilité en cas de manque d'informations sur l'usage ou l'origine de matières premières de récupération ;
- attribution (classification) «équitable» des crédits et débits aux producteurs et consommateurs de matières premières de récupération.

Dans la pratique, la tâche à forte intensité de main-d'œuvre qu'est l'acquisition des données se heurte souvent à des limites. Dans le cadre d'une ACV, il arrive que l'on ne puisse pas mesurer tous les intrants et extrants parce que les données ne sont pas disponibles, que l'accès aux données est restreint ou que le temps et les capacités font défaut. Aussi, il importe de décider quels sont les procédés à étudier et jusqu'où l'examen doit être poussé. Le but est de déterminer les flux de matières essentiels dans un délai et au prix d'un effort raisonnables, et ces informations sont obtenues au cours de l'étude par un processus itératif. Les flux de matières peuvent être différenciés en fonction de la masse, de l'énergie ou des catégories d'effets sur l'environnement :

- flux massiques dont l'accumulation contribue pour un pourcentage donné au bilan massique du système de produit étudié ;
- flux massiques dont l'accumulation contribue pour un pourcentage donné au bilan énergétique du système de produit étudié ;
- flux massiques qui contribuent pour un pourcentage donné à une catégorie d'effets étudiée (par exemple, les émissions de CO₂).

Dans le cas d'études comparatives destinées à la publication, ces différentes approches doivent être comparées au moyen d'une analyse de sensibilité.

Contrairement aux valeurs physiques mentionnées ci-avant, les facteurs économiques tels que la valeur marchande sont moins bien adaptés au rôle de données de référence, dans la mesure où ils sont soumis à d'importantes fluctuations de marché.

ÉVALUATION DE L'IMPACT

Pour ce qui est de l'inventaire, un consensus se dessine peu à peu autour de la procédure, même si quelques questions concernant les méthodes et aspects pratiques restent toujours sans réponse. Il n'en va pas de même de l'évaluation de l'impact. Ces dernières années, de nombreuses méthodes d'évaluation des incidences ont été développées. L'évaluation de l'impact a pour fonction d'examiner les données recueillies et le cas échéant agrégées dans l'inventaire (flux massiques et énergétiques, rejets dans l'environnement, etc.) afin d'identifier les conséquences possibles pour l'environnement. Il est largement admis que les domaines nécessitant une protection sont la santé humaine, l'environnement naturel et les ressources.

L'évaluation de l'impact du cycle de vie regroupe plusieurs éléments (ISO 14042, 1997) : définition des catégories, classification, caractérisation et pondération. A chaque élément correspondent une procédure et un ensemble de méthodes spécifiques ; les hypothèses et jugements de valeur peuvent être rendus plus transparents par une distinction claire entre les éléments.

Le premier élément, la définition des catégories, consiste à identifier les différentes catégories qui seront couvertes par l'ACV. Ensuite, la classification affecte les données d'inventaire à ces catégories. La caractérisation implique un effort de détermination et de quantification des effets potentiels pour chaque critère d'impact. Chaque fois que c'est possible, l'évaluation de l'impact du cycle de vie (EICV) s'efforce d'adopter une approche quantitative ; dans certains cas, on recourt toutefois à des jugements de valeur pour définir les catégories et développer des modèles de catégories. La pondération des résultats consiste en une comparaison des systèmes dans les différentes catégories. Il s'agit de l'aspect le plus controversé de l'ACV, dans la mesure où la pondération ne repose pas sur des règles scientifiquement vérifiées ou généralement admises. On a développé de nombreuses procédures différentes qui présentent chacune des avantages et des inconvénients particuliers.

Pour la pondération, il convient d'examiner des principes et non pas des méthodes considérées isolément, dans la mesure où cet exercice est fortement influencé par les valeurs et se caractérise donc par des éléments subjectifs. On peut définir le processus d'évaluation qui accompagne la pondération comme « l'établissement de liens entre les informations disponibles sur un ensemble de faits donnés et un système de valeurs personnel, de façon à former un jugement sur les faits eux-mêmes » (Giegrich *et al.*, 1995). Il serait donc inexact de parler d'une « pondération objective ». Pour autant, cela ne signifie pas que la pondération est nécessairement arbitraire. Il est essentiel que toutes les questions

pertinentes soient présentées de façon suffisamment claire et précise pour qu'elles soient comprises à coup sûr par les personnes extérieures. Les valeurs qui sous-tendent la pondération peuvent émaner de l'opinion des experts (établie, par exemple, par des méthodes par panel), de directives et objectifs politiques et de l'opinion personnelle de représentants du public.

Il va de soi que des valeurs subjectives distinctes peuvent déboucher sur des jugements fondamentalement différents à propos d'une même question. Le tableau 4.1 de l'annexe présente une compilation des nombreuses exigences formulées à l'endroit des méthodes d'évaluation de l'impact. Il convient de souligner que pas plus les procédures existantes que celles à venir ne seront en mesure de satisfaire chacune de ces exigences, notamment parce que ces dernières ne sont elles-mêmes pas exemptes de toute contradiction.

Annexe : Tableau 4.1. **Exigences à l'égard de l'évaluation de l'impact**

| | |
|--------------|--|
| Exhaustivité | Interpréter l'ensemble des interférences ou impacts <i>pertinents</i> au niveau de l'environnement (et non tous ceux qui sont produits) Tenir compte sous une forme ou une autre de la rareté écologique Prendre en compte les intérêts de toutes les parties concernées par l'évaluation du produit |
| Transparence | Être facile à comprendre Être communicable Mentionner explicitement les critères de pondération utilisés Tenir compte des incertitudes Exécuter explicitement toutes les étapes de la pondération et présenter les résultats Présenter les conclusions de chaque étape de la pondération Employer une terminologie adaptée au groupe cible Présenter des résultats reproductibles |
| Contenu | Présenter des résultats fiables et indépendants issus d'examens à court terme Prendre en compte de façon appropriée les aspects temporels et spatiaux Comporter des éléments dynamiques rendant possibles des pronostics Formuler des hypothèses justifiables et scientifiquement rationnelles Le responsable de l'évaluation peut incorporer des pondérations personnelles Traduire le caractère subjectif de la pondération en général Revêtir si possible un caractère quantitatif tout en autorisant des aspects qualitatifs Comporter autant d'informations scientifiques que possible Tenir compte d'une manière ou d'une autre des effets combinés Éviter que l'unité de mesure des impacts (kg, par exemple) n'affecte la pondération |
| Faisabilité | Déboucher sur des enseignements clairs Être normalisé Être réalisable dans un délai court et à faible coût Constituer un instrument de contrôle efficace Faire en sorte que les principes de pondération restent simples et compréhensibles Assurer la stabilité des facteurs de pondération Utiliser des notes ou des indicateurs simples aux fins de communication |

Source : Hofstetter, 1996.

Le tableau 4.2 de l'annexe propose une représentation systématique des démarches interprétatives existantes; les éléments très subjectifs y sont répertoriés en italiques.

Différentes procédures d'évaluation de l'impact ont été comparées sur la base des émissions et des interférences avec l'environnement mondial (figure 4.2 du chapitre 4). Cette comparaison fait apparaître une large palette de priorités, ce qui s'explique par l'emploi de différentes méthodologies et par l'utilisation de différents ensembles de données pour la pondération. Les méthodes examinées ne poursuivent pas toutes les mêmes objectifs, ce qui entraîne automatiquement des différences dans l'évaluation de l'impact. Cela étant, on peut démontrer que la plupart des méthodes sont capables de décrire plus de 90 pour cent des incidences mondiales à partir d'un nombre relativement limité

Annexe : Tableau 4.2. **Méthodes reliant les informations aux systèmes de valeurs**

| Méthode | Description succincte | Exemple |
|---|---|----------------|
| Approche analytique par la valeur d'utilité | Formulation des critères <i>Pondération des critères</i> <i>Attribution de degrés de réalisation des objectifs</i> Calcul mathématique | VNCI, Pays-Bas |
| Approche pertes-avantages | Liste des aspects individuels <i>Attribution de valeurs unidimensionnelles de perte/avantage</i> Somme des valeurs | EPS, Suède |
| Quantités critiques/rareté écologique | Liste des aspects individuels <i>Définition de quantités critiques/flux de matières</i> Calcul de volumes/flux critiques Somme des valeurs | BUWAL, Suisse |
| Argumentation verbale | Liste des aspects individuels <i>Examen déductif</i> par arguments de valeur Obtention de l'évaluation de l'impact | UBA, Allemagne |

Source : Giegrich *et al.*, 1995.

d'émissions ou de ressources. Souvent, on accorde une priorité élevée au réchauffement planétaire et à l'appauvrissement de la couche d'ozone, tandis que l'utilisation des terres se voit attribuer une faible priorité. Le Landbank Panel met fortement l'accent sur le réchauffement de la planète (plus de 80 pour cent), et la méthode EPS privilégie dans une large mesure l'utilisation de ressources (environ 70 pour cent). Une définition aussi tranchée des priorités doit faire l'objet d'un examen minutieux.

Le degré d'exhaustivité, la sélection des impacts sur l'environnement à évaluer et les méthodes à employer dépendent de l'objectif et du champ d'étude de l'ACV. On peut répartir en trois groupes les diverses approches développées pour l'évaluation de l'impact : méthodes se rapportant aux catégories et possibilités d'impacts ; méthodes ayant trait aux émissions pondérées dans les milieux de l'environnement ; méthodes se rapportant à des paramètres d'impact global, tels que la consommation d'énergie et l'intensité de matières.

Méthodes se rapportant aux catégories et possibilités d'impact

On s'accorde à reconnaître que les catégories d'impacts suivantes doivent être prises en considération : épuisement des ressources ; réchauffement planétaire ; appauvrissement de la couche d'ozone.

D'autres catégories continuent de faire l'objet de discussions : formation d'oxydants photochimiques (« smog d'été ») ; acidification ; enrichissement en éléments nutritifs ; toxicité pour l'être humain ; écotoxicité ; diminution de la diversité des espèces ; nuisances olfactives ; bruit ; utilisation des terres ; et risques d'accidents.

La question du choix des catégories à prendre en considération est liée à la faisabilité de la caractérisation, c'est-à-dire de la quantification des impacts potentiels. Le réchauffement planétaire et l'appauvrissement de la couche d'ozone se rapportent à l'évidence à des incidences mondiales que l'on peut estimer de façon satisfaisante à partir des charges recueillies pour l'inventaire. En revanche, les oxydants photochimiques, l'acidification et l'enrichissement en éléments nutritifs revêtent un caractère régional et, selon leur type et leur ampleur, peuvent produire des impacts différents en fonction des conditions de chaque région. Les aspects spatiaux sont normalement exclus d'une ACV. Bien qu'il existe différentes méthodes de caractérisation pour ces catégories, de nouvelles études sont nécessaires dans ce domaine.

L'évaluation concluante de l'impact en termes de toxicité pour l'homme, d'écotoxicité, de biodiversité, de bruit, de nuisances olfactives et d'utilisation des terres appartient à un avenir lointain. Les approches actuelles divergent notamment du point de vue de la prise en compte de paramètres de

répartition et d'épuisement des substances déterminées. Les problèmes proviennent en particulier d'une vérification insuffisante des données sur la toxicité et d'un manque de données sur l'épuisement et sur les produits intermédiaires et sous-produits qu'il engendre.

On peut affirmer de manière catégorique que l'ACV n'a pas pour but de déterminer les incidences effectivement induites par un produit en fonction de ces catégories, car les principes scientifiques et les données correspondantes n'existent tout simplement pas dans beaucoup de secteurs. L'évaluation concerne les impacts sur l'environnement émanant potentiellement des facteurs de perturbation déterminés dans l'inventaire. Les facteurs de perturbation sont les conditions qui peuvent exercer une influence négative sur les catégories définies ci-avant. Lorsqu'un facteur de perturbation, par exemple le NO_x , affecte plusieurs catégories, il est examiné plusieurs fois. Même lorsqu'on a évalué les impacts potentiels, des incertitudes considérables subsistent, comme le montre l'exemple du réchauffement planétaire exposé dans le tableau 4.3 de l'annexe.

Annexe : Tableau 4.3. **Structure des impacts potentiels sur l'environnement**

| Séquence | Exemple | Moyen de quantification |
|----------------------|--|---|
| Primaire | Modification de l'absorption des rayonnements infrarouges (IR) | Absorption des rayonnements IR et persistance des gaz |
| Secondaire | Modification de la température de la planète | Calculs complexes en fonction de l'échelle |
| Tertiaire et au-delà | Modification du climat et conséquences écologiques | La détermination des conséquences est difficile |

Source : Conseil nordique des ministres, 1992.

Concernant la quantification des impacts, il existe diverses conceptions selon lesquelles, du point 1 au point 5 ci-dessous, la demande de données augmente et la faisabilité dans les limites d'une ACV diminue (Klöppfer et Renner, 1995).

1. Ajout de pollution sous forme de charges.
2. Détermination de facteurs d'équivalence liés aux charges.
3. Cumul en fonction des propriétés chimiques intrinsèques des matières, telles que la toxicité, la persistance et la bio-accumulation.
4. Évaluation générale des liens entre facteur de perturbation et effet.
5. Évaluation spécifique d'un site.

Selon la méthode néerlandaise, l'interférence avec l'environnement, en termes de propriétés des matières et en termes de modèles généralement valables, est étroitement liée aux impacts potentiels sur l'environnement. Aux fins de classification et de caractérisation, ses concepteurs ont créé 15 catégories d'impacts (tableau 4.4 de l'annexe). Toutes font l'objet de textes ou d'accords internationaux destinés à la protection de l'environnement, tels que la Déclaration de Rio, le programme Action 21 et le Protocole de Montréal.

Pour caractériser et chiffrer la contribution de flux de matières aux catégories d'impacts, la formule de calcul est donnée sous la forme suivante pour toutes les catégories :

$$\text{Écotoxicité aquatique } [m^3] = \sum_i CEA_i [m^3/mg] \times \text{émissions}_i \text{ dans l'eau } [mg].$$

Cette méthode de quantification est fréquemment remise en cause. Aujourd'hui, des méthodes de caractérisation très largement reconnues existent uniquement pour le réchauffement planétaire et l'appauvrissement de la couche d'ozone.

Annexe : Tableau 4.4. **Catégories d'impacts définies par le Centre of Environmental Science, Leyde (CML)**

| Catégorie d'impacts | Unité | Facteur de classification |
|--|--------------------|---------------------------|
| Épuisement des ressources non biologiques | | 1/réserves |
| Épuisement des ressources biologiques | a ⁻¹ | FAB |
| Impact du réchauffement planétaire | kg | PRP |
| Appauvrissement de la couche d'ozone | kg | PDO |
| Toxicité pour l'être humain | kg | CHA, CHE, CHS |
| Écotoxicité (milieux aquatiques) | m ³ | CEA |
| Écotoxicité (milieux terrestres) | kg | CET |
| Formation d'oxydants photochimiques (« smog d'été ») | kg | PCOP |
| Acidification | kg | PA |
| Enrichissement en éléments nutritifs | kg | PEN |
| Chaleur résiduelle par le biais des eaux usées | MJ | 1 |
| Pollution olfactive | m ³ | 1/VSO |
| Bruit | Pa ² *s | 1 |
| Atteintes aux écosystèmes et paysages | m ² *s | 1 |
| Victimes (humaines) | | 1 |

Abréviations :

| | |
|------|--|
| FAB | facteur d'appauvrissement biologique. |
| PRP | potentiel de réchauffement de la planète. |
| PDO | potentiel de destruction de l'ozone. |
| CHA | facteur de classification toxicologique humaine (atmosphère). |
| CHE | facteur de classification toxicologique humaine (eau). |
| CHS | facteur de classification toxicologique humaine (sols). |
| CEA | facteur de classification écologique des écosystèmes aquatiques. |
| CET | facteur de classification écologique des écosystèmes terrestres. |
| PCOP | potentiel de création d'ozone photochimique. |
| PA | potentiel d'acidification. |
| PEN | potentiel d'enrichissement en éléments nutritifs. |
| VSO | valeur de seuil olfactif. |

Source : Heijungs, 1992.

Méthodes se rapportant aux émissions pondérées dans les milieux de l'environnement

Au début du recours aux ACV, on utilisait souvent la méthode suisse des volumes critiques (Ahbe *et al.*, 1991). En l'occurrence, la pondération est opérée à partir de valeurs limites existantes spécifiques de chaque substance *i* :

$$\text{Volume critique}_i \text{ [m}^3\text{]} = \text{charge d'émissions}_i \text{ [mg]} / \text{valeur limite}_i \text{ [mg/m}^3\text{]}.$$

Ensuite, on fait la somme des émissions pondérées individuelles dans les catégories de l'environnement que sont l'eau et l'air. Par conséquent, le volume critique correspond au volume – purement théorique – d'air ou d'eau non pollué qui serait pollué par la charge d'émissions du système de produit étudié jusqu'à atteindre les valeurs limites. Cela ne sous-entend en aucun cas qu'il serait souhaitable d'atteindre les valeurs limites existantes. Outre les volumes critiques d'eau et d'air, cette méthode permet d'obtenir la valeur d'équivalence énergétique (MJ/kg) et le volume de déchets solides (cm³/kg).

La somme des quantités d'air et d'eau critiques pour toutes les substances émises dans un milieu, qui reflète normalement sa pollution, doit être employée pour l'évaluation. Si cette méthode présente des possibilités de faisabilité optimales dans le cadre d'une ACV, elle a fait l'objet de critiques sur quatre points (Klopffer et Renner, 1995) :

1. Par principe, les valeurs limites sont axées sur la santé humaine et non sur la toxicité.
2. Les valeurs limites n'ont pas un caractère scientifique strict, mais constituent généralement un compromis entre des considérations techniques relatives à la protection, à la mesure et à l'action correctrice.
3. Les valeurs limites peuvent varier considérablement d'un pays à l'autre pour une même substance.
4. Il n'existe pas de valeurs limites pour bon nombre de substances, ce qui ne permet pas pour autant de conclure à leur innocuité écologique.

Méthodes se rapportant à des paramètres d'impact global

On a élaboré des paramètres d'impact global qui utilisent comme points de référence l'énergie et la masse. Il s'agit d'ACV quelque peu simplifiées, qui peuvent néanmoins fournir des informations importantes et signaler des cas de pollution grave. Au sens strict, la consommation d'énergie ne constitue pas un impact sur l'environnement, même s'il est admis qu'elle représente un problème d'environnement majeur. La pollution liée à la fourniture et à la distribution d'énergie a une influence énorme sur l'environnement animé et inanimé.

La valeur d'équivalence énergétique, ou consommation d'énergie cumulée, a été recueillie dans bon nombre d'inventaires. Elle représente l'estimation de l'énergie en fonction de la consommation nécessaire d'énergie primaire. La règle veut qu'elle soit donnée en mégajoules (MJ) et qu'elle englobe tous les types d'énergie intervenant dans les procédés et l'énergie intrinsèque des substances utilisées. Afin de minimiser les pertes d'informations, l'énergie des procédés, l'énergie intrinsèque et l'énergie électrique (en kWh) peuvent être notifiées séparément. Il en va de même de l'énergie issue des matières premières renouvelables, qui peut alors être prise en compte dans le calcul du potentiel de réchauffement de la planète. Si la valeur d'équivalence énergétique/consommation d'énergie cumulée est retenue comme catégorie d'impacts, il convient de noter que certaines valeurs sont comptées en double, puisque d'autres catégories d'impacts prennent également en compte une partie des facteurs de pollution liés à l'utilisation d'énergie.

Le concept fondamental d'intensité de matières par unité de service découle du constat que, dans les pays industrialisés, une lutte efficace contre la pollution impose de réduire les flux de matières en circulation. L'expérience nous enseigne qu'entre deux produits comparables remplissant la même fonction, celui qui présente la plus forte intensité massique engendre une pollution plus grave. En effet, chaque mouvement au sein d'un flux de matières, qu'il s'inscrive dans la production de matières premières ou d'énergie, est indissociable des répercussions correspondantes sur l'environnement (Schmidt-Bleek, 1993).

Il découle de la méthode de l'intensité de matières par unité de service que l'on peut utiliser l'intensité de matières des procédés et produits par unité de service produite comme une mesure globale des impacts sur l'environnement. A cette fin, il convient de déterminer et d'agrèger tous les flux d'intrants sur l'ensemble du cycle de vie du produit. Les données nécessaires sont contenues dans l'inventaire d'une ACV « exhaustive ».

Si on le considère isolément, le concept d'intensité de matières par unité de service adopte une démarche purement quantitative. Lorsque apparaissent des substances toxiques, cette approche peut induire une interprétation erronée des incidences prévues sur l'environnement. C'est pourquoi cette méthode est à l'heure actuelle au cœur d'un débat animé. Elle présente cependant l'avantage de ne pas dépendre de données relativement incertaines sur les extrants des procédés, mais de se fonder au contraire exclusivement sur les flux d'intrants disponibles.

INTERPRÉTATION

Dans le cadre de l'interprétation, on fait la synthèse des résultats de l'inventaire, de l'évaluation des impacts ou d'une combinaison des deux, conformément à l'objectif et au champ qui ont été définis pour l'ACV. Par conséquent, l'interprétation peut par exemple servir à analyser les défauts internes ou être utilisée comme instrument pour la prise de décision. L'interprétation comprend trois phases (ISO 14043, 1997) :

- identification des intrants, extrants et impacts potentiels les plus importants;
- évaluation à trois niveaux : vérification de l'exhaustivité, vérification de l'analyse de sensibilité et contrôle de la cohérence;
- conclusions, recommandations et notification.

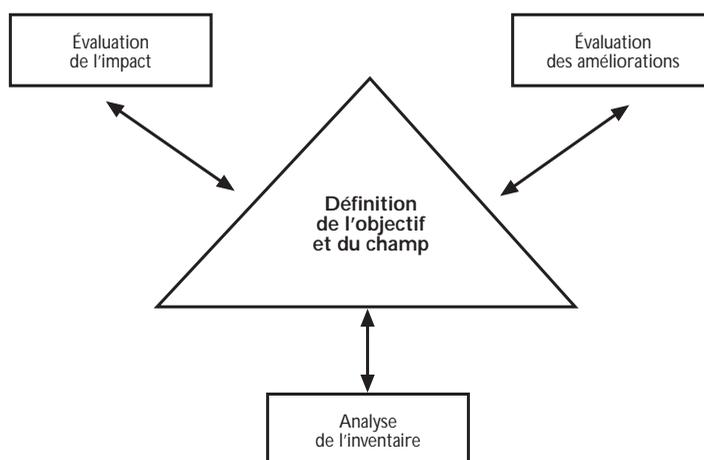
En résumé, l'ACV est un instrument qui fournit des informations précieuses pour préparer et étayer les décisions. En revanche, on aurait tort de penser que les ACV peuvent plus ou moins déterminer les décisions d'ordre politique.

Annexe 4.2

NORMALISATION DES ACV

Diverses études ont tenté de fixer au moins les paramètres les plus importants. Les premiers résultats, portant sur le plan de travail et la méthodologie, sont parus en 1993. La SETAC (*Society of Environmental Toxicology and Chemistry*) a publié son concept dans un Code de pratiques (figure 4.3 de l'annexe).

◆ Annexe Figure 4.3. *Principes directeurs de la SETAC pour l'ACV*

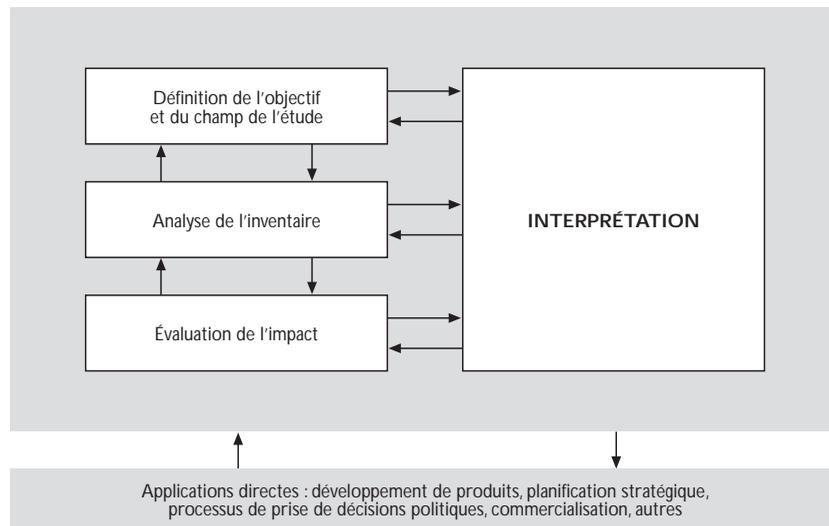


Source : SETAC, 1993.

Le Comité technique « Management environnemental » (TC 207) de l'Organisation internationale de normalisation (ISO) travaille actuellement à l'élaboration de normes ISO pour l'analyse du cycle de vie. Les éléments du concept de l'ISO sont représentés à la figure 4.4 de l'annexe.

L'ACV comprend quatre étapes : définition de l'objectif et du champ de l'étude, analyse de l'inventaire, évaluation de l'impact et interprétation. Pour sa part, l'inventaire du cycle de vie (ICV) exclut l'étape d'évaluation de l'impact. Le recours à une ACV, par exemple pour aider à la prise de décision dans l'industrie ou à la définition de priorités par les pouvoirs publics, ou encore pour aider à la planification stratégique et au développement de produits et de procédés, n'entre pas dans le cadre de l'ACV elle-même. Cela vaut également pour les décisions socio-politiques et économiques. Si l'un des produits en concurrence présente des avantages écrasants d'un point de vue technique ou économique, il n'est normalement pas nécessaire de conduire une ACV.

◆ Annexe Figure 4.4. *Phases d'une ACV*



Source : ISO 14040, 1997.

L'ISO prépare actuellement quatre normes dans ce domaine :

- ISO 14040 : Management environnemental – Analyse du cycle de vie – Principes et cadre ;
- ISO 14041 : Management environnemental – Analyse du cycle de vie – Objectif et définition de l'étendue et analyse de l'inventaire ;
- ISO 14042 : Management environnemental – Analyse du cycle de vie – Évaluation de l'impact du cycle de vie ;
- ISO 14043 : Management environnemental – Analyse du cycle de vie – Interprétation du cycle de vie.

ISO 14040 a été adopté et publié en 1997. ISO 14041 s'est également vu conférer le statut de norme ISO en 1997. La proposition ISO 14042 est aujourd'hui entrée dans la phase principale de développement, tandis que la proposition ISO 14043 reste en phase exploratoire. En ce qui concerne les normes sur «l'analyse du cycle de vie» et «l'interprétation du cycle de vie», un travail considérable reste à accomplir dans le domaine de l'interprétation. Toutes ces propositions de normes ont en commun de laisser une marge de manœuvre relativement importante à ceux qui réalisent les ACV. Cette liberté concédée s'explique par le fait que l'application des ACV est un exercice encore récent, mais aussi par le fait que le cadre des recherches, tout comme leur champ et leur niveau de détail, dépendent dans une large mesure de l'objet de l'étude et de l'usage auquel elle est destinée. Or une définition normative de portée générale ne pourrait pas tenir suffisamment compte de cette hétérogénéité.

Annexe 4.3

EXAMEN DES ANALYSES DU CYCLE DE VIE

L'examen présenté dans cette annexe se limite à l'Allemagne, l'Italie, la Suède et la Suisse¹. Il recense et décrit les ACV en cours et achevées et se fonde sur les méthodes de recherche d'informations suivantes :

- envoi par la poste de questionnaires à des entreprises et institutions choisies;
- contacts avec des chercheurs, des consultants et d'autres parties essentielles;
- analyse de la bibliographie de l'IÖW (Grotz et Rubik, 1996);
- examen des revues et publications pertinentes;
- utilisation des bases de données en ligne.

GÉNÉRALITÉS SUR L'APPLICATION

Le tableau 4.5 de l'annexe ventile le nombre total des ACV connues. En Allemagne, près de 300 études ont été compilées ou sont en cours de planification. En Suisse et en Suède, on a dénombré quelque 150 études, alors que l'Italie affiche un retard relatif en la matière.

Il convient de souligner que ces données statistiques sont incomplètes, car un certain nombre d'études n'ont pas pu être retenues en raison de demandes de confidentialité formulées par les organismes commanditaires². Les chiffres doivent donc être considérés comme des limites inférieures. Une analyse statistique précise se heurte à plusieurs problèmes de taille :

- Concernant les études d'ACV en cours, l'information est parfois très ténue. On connaît l'organisme commanditaire, mais il est impossible de fournir une date de publication.
- Dans certains cas, l'organisme commanditaire n'est même pas mentionné dans l'étude. L'étude est alors classée dans la catégorie « organisme commanditaire inconnu ».
- Dans le questionnaire renvoyé, certaines entreprises contactées ont indiqué qu'elles avaient commandé plusieurs études. Si le nombre exact était signalé, il a été pris en compte; sinon (réponse « Davantage »), une seule étude a été comptabilisée.
- Certaines entreprises interrogées ont indiqué que des études avaient été réalisées et également que des études étaient en cours. Dans ces cas, l'étude a été compté deux fois : une fois pour l'étude réalisée et une fois pour l'étude en cours. En revanche, l'étude en cours n'a pas été incluse dans les analyses statistiques en ce qui concerne l'année de publication, l'organisme commanditaire, l'entreprise et l'objet.

Annexe : Tableau 4.5. **ACV connues dans divers pays**

| Études | Italie | Suisse | Suède | Allemagne |
|-----------|--------|--------|-------|-----------|
| Terminées | 27 | 149 | 137 | 250 |
| En cours | n.d. | n.d. | 6 | 36 |
| Prévues | n.d. | n.d. | 2 | 2 |
| Total | 27 | 149 | 145 | 288 |

n.d. = non disponible.

- Les informations statistiques présentées ci-après doivent être considérées à la lumière de ces réserves. Les analyses sont classées par année de publication, organisme commanditaire, secteur(s) d'activité concerné(s), taille de l'entreprise commanditaire et produits étudiés³.

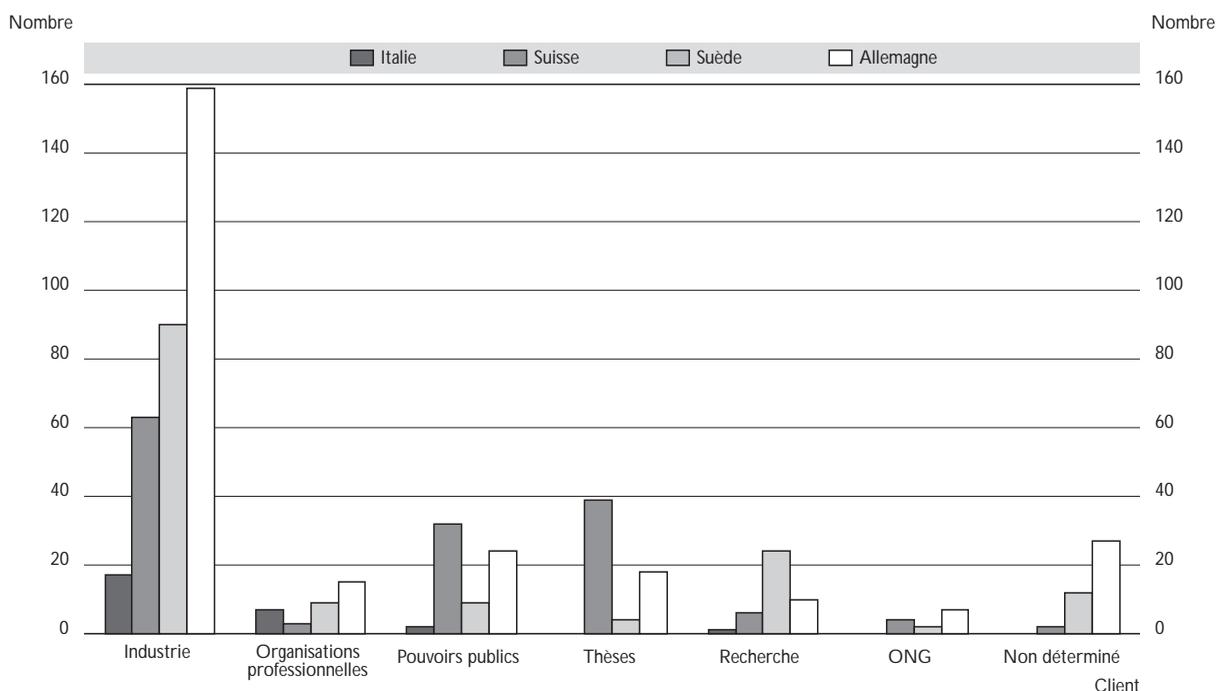
ANNÉE DE PUBLICATION

Avant le début des années 80, les analyses du cycle de vie (ACV) étaient extrêmement rares, puis leur nombre a augmenté à compter du milieu des années 80 et le mouvement s'est accéléré au cours des années 90. En Allemagne, pas moins de 16 études ont ainsi été conduites chaque année depuis 1990 – et le chiffre de sept études pour 1996 ne doit en aucun cas être interprété comme une inversion de la tendance car à la date de l'enquête statistique (été 1996) un grand nombre d'études n'étaient pas terminées. En outre, il s'écoule toujours un certain laps de temps entre l'achèvement d'une étude et sa diffusion. En Suisse, le nombre d'ACV s'est maintenu dans une fourchette de 15 à 20 par an au cours de la présente décennie, et en Suède, leur nombre a explosé à partir de 1992, et ce pays en a produit depuis lors pratiquement autant que l'Allemagne.

ORGANISMES COMMANDITAIRES ET FACTEURS DE MOTIVATION

La figure 4.5 de l'annexe présente une répartition selon les organismes qui commandent des ACV. En Allemagne, ce sont les entreprises qui sont les principaux commanditaires (61 pour cent), suivies par les organisations professionnelles. Le secteur public est également un commanditaire important, mais loin derrière le secteur privé. En Suisse, la part des ACV commanditées par les entreprises est aussi particulièrement significative (42 pour cent) et, comme en Allemagne, le secteur public prend une part active au mouvement. En Suède, le secteur privé commande approximativement 60 pour cent des études, et la part du secteur public est relativement insignifiante. En Italie, le secteur privé est également prépondérant.

◆ Annexe Figure 4.5. *Organismes commanditant des ACV*



Cela étant, il ne faut pas sous-estimer le rôle du secteur public puisque les ACV qu'il commande ont des répercussions sur le secteur privé. Les ACV commanditées par le secteur public attachent une plus grande importance aux données génériques et publient généralement des valeurs « moyennes », alors que le secteur privé s'intéresse plus particulièrement à des données spécifiques auxquelles il est d'ailleurs plus sensible. A cet égard, l'ACV est un outil tout à fait approprié.

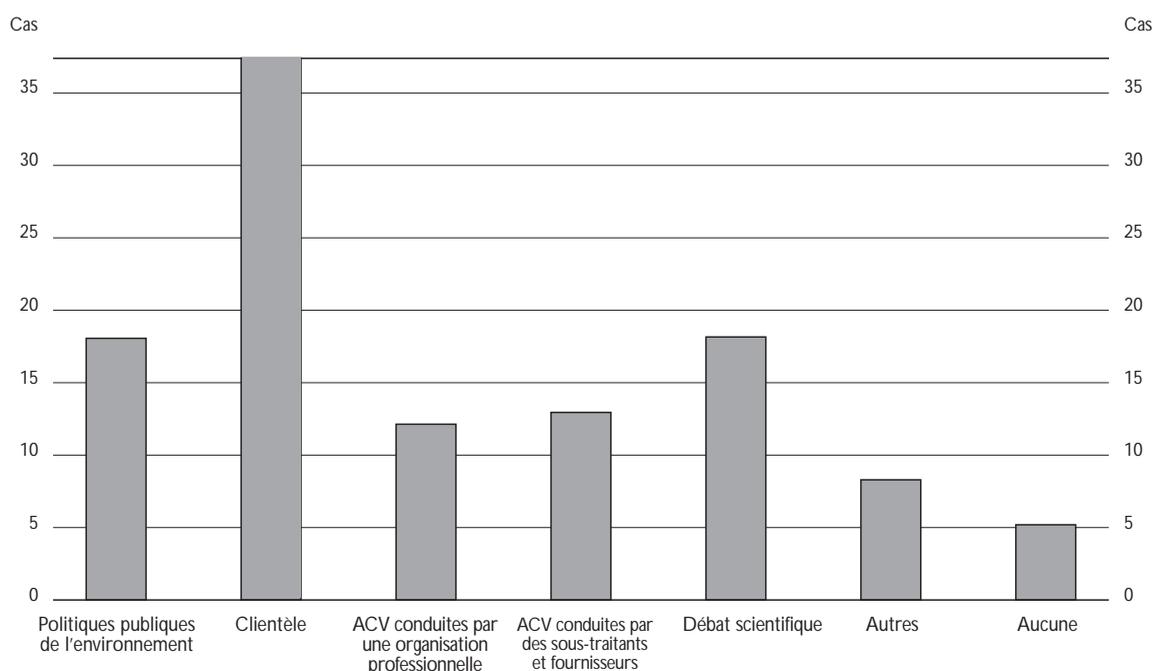
Certains instruments des politiques nationales de l'environnement axées sur les produits (Oosterhuis *et al.*, 1996; Rubik et Teichert, 1997) se réfèrent explicitement ou implicitement à l'ACV ou à une approche théorique fondée sur le cycle de vie; c'est par exemple le cas du programme allemand de label écologique « Ange bleu » et de la nouvelle loi de gestion des déchets adoptée par l'Allemagne (*Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz*). Ces initiatives favorisent l'application d'ACV dans le secteur privé; ainsi, le programme européen de label écologique est explicitement fondé sur les résultats d'ACV.

En plus des politiques publiques, le marché peut lui aussi fortement inciter les entreprises à adopter l'ACV. En réponse aux demandes d'informations formulées par les détaillants et les consommateurs sur les caractéristiques écologiques des produits, certaines sociétés exploitent les résultats de leurs ACV dans leurs campagnes de commercialisation, et obligent à l'occasion leurs concurrents à en faire de même.

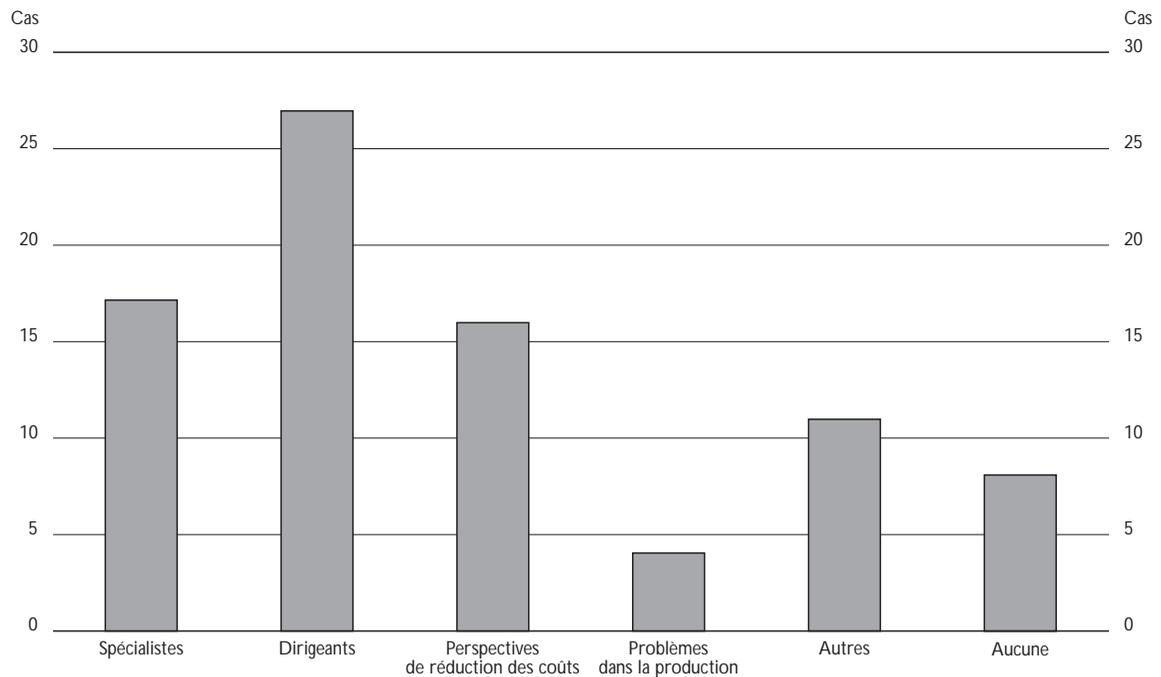
Par ailleurs, les politiques publiques et le marché ont parfois incité des entreprises ou un secteur dans son ensemble (par exemple, l'automobile et l'industrie chimique) à entreprendre des ACV conjointes. Les études peuvent aussi être favorisées par des facteurs internes, tels que des initiatives prises par les dirigeants ou certains départements et articulées autour d'un objectif environnemental.

Une étude menée par l'IÖW pour l'Allemagne conclut qu'il existe presque toujours une combinaison de facteurs internes et externes (figures 4.6 et 4.7 de l'annexe). En effet, sur l'ensemble des entreprises examinées par l'IÖW, seule une minorité a indiqué que les décisions prises étaient influencées uniquement par des éléments internes ou externes (9.48 pour cent et 15.18 pour cent,

◆ Annexe Figure 4.6. *Influences externes incitant les entreprises allemandes à procéder à des ACV*
Nombre absolu de réponses



◆ Annexe Figure 4.7. *Influences internes incitant les entreprises allemandes à procéder à des ACV*
Nombre absolu de réponses



Source : IÖW, 1995.

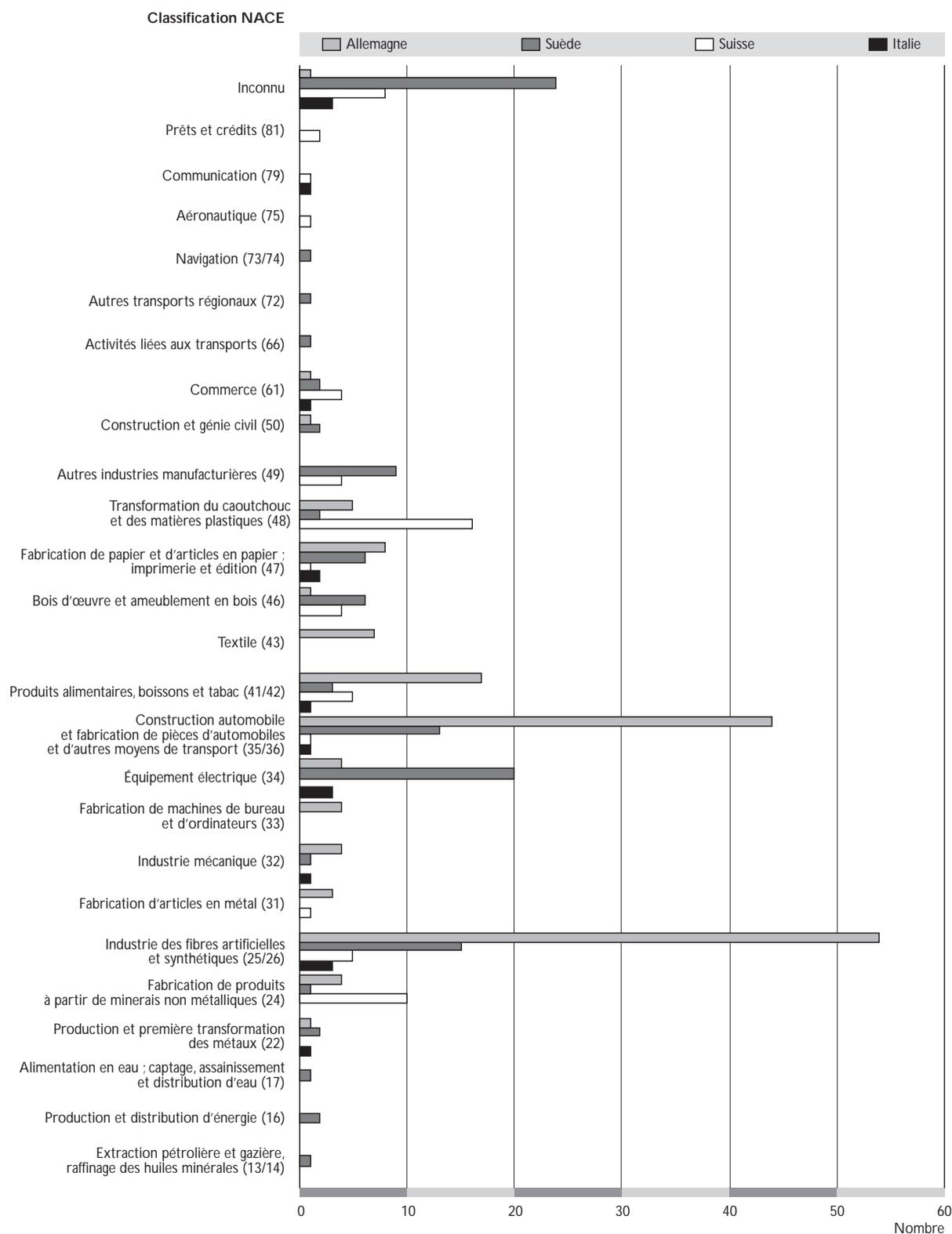
respectivement). A cet égard, la prise en compte de la sensibilisation accrue des consommateurs aux questions d'environnement est le facteur le plus important. Autrement dit, les détaillants et les consommateurs ont un poids tel sur le marché que leur comportement peut influencer les producteurs et les inciter à adopter une conduite respectueuse de l'environnement. Par ailleurs, le recours aux ACV est également favorisé, dans une certaine mesure, par les politiques de l'environnement et les débats scientifiques. Le nombre d'études réalisées en coopération avec des organisations professionnelles ou des sous-traitants et fournisseurs est relativement faible, mais celles qui ont été menées traduisent néanmoins l'existence d'une certaine coopération entre les entreprises pour la conduite d'ACV.

Il apparaît que les efforts en faveur de la protection de l'environnement sont principalement du ressort des dirigeants, puisque dans les entreprises ce sont essentiellement eux qui ont incité à la conduite d'ACV (figure 4.7 de l'annexe). La perspective d'une réduction des coûts, notamment par une utilisation moindre de ressources, n'est pas non plus négligeable, et nombre d'entreprises ont pris conscience du fait que protection de l'environnement et rentabilité n'étaient pas nécessairement incompatibles. Dans ce contexte, ce sont essentiellement les économies de ressources qui permettent de réduire les coûts. Le fait que les problèmes rencontrés avec un produit donné n'incitent que très rarement les entreprises à conduire une ACV indique que c'est l'orientation générale en faveur de l'écologie qui pousse de manière décisive à l'utilisation de cet outil, bien plus que des problèmes concrets.

PARTICIPATION A DES ACV PAR SECTEUR

La figure 4.8 de l'annexe montre que ce sont essentiellement des entreprises (classées par activité économique principale) qui commandent des ACV.

◆ Annexe Figure 4.8. *Établissements du secteur privé commanditant des ACV*
Par branche



En Allemagne, l'industrie chimique et l'automobile sont les principaux commanditaires d'ACV, suivies par les industries alimentaires et le secteur des denrées alimentaires de luxe. A l'heure actuelle, les autres secteurs ont commandé moins de dix ACV chacun. L'analyse en fonction de la taille (déterminée par le nombre d'employés) montre que 84 pour cent des établissements qui mènent ou commandent des ACV sont des grandes entreprises, et 16 pour cent seulement des petites et moyennes entreprises (moins de 500 salariés).

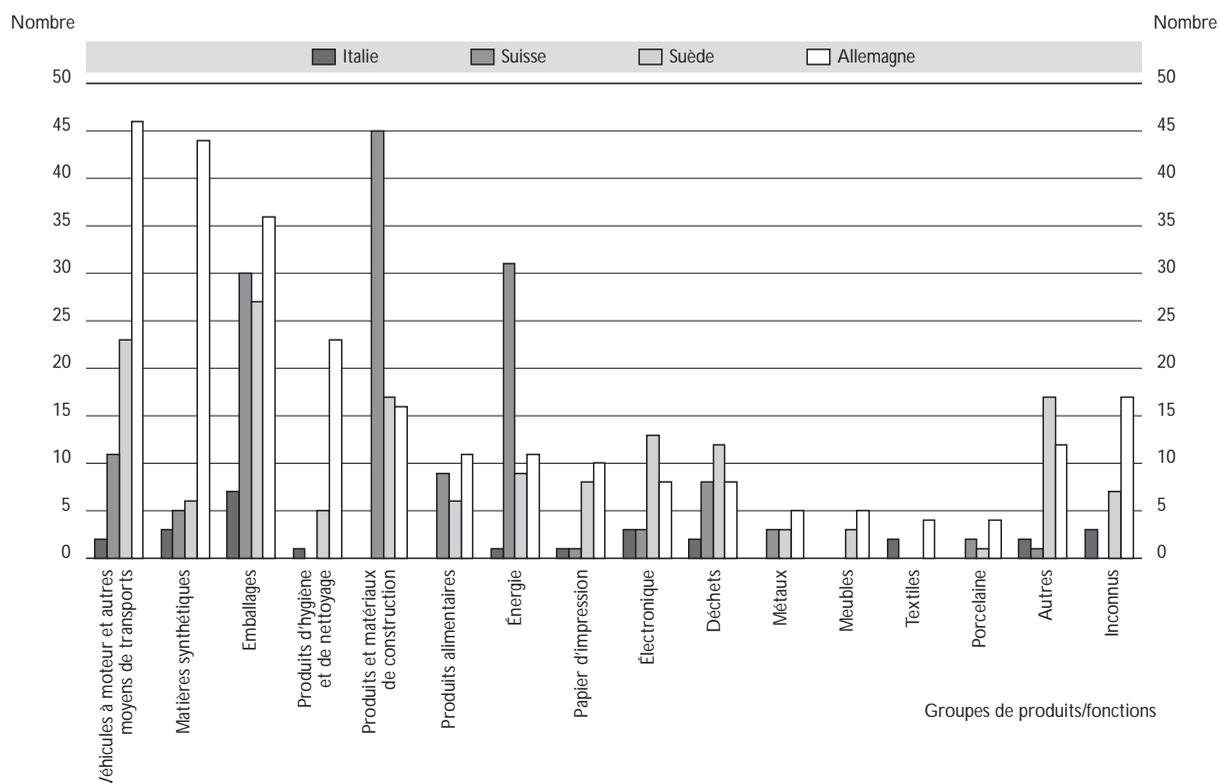
En Suisse, c'est le secteur de la transformation du caoutchouc et des matières plastiques qui commande le plus grand nombre d'ACV (16 études), suivi par le secteur de la manutention et de la transformation des minerais non métalliques et du traitement et de la fabrication du verre (dix études). L'ensemble des autres branches ne dépasse pas la barre des 10 pour cent. En Suède, le secteur de l'équipement électrique vient en tête (20 études), suivi de l'industrie chimique (15 études) et de l'automobile (13 études). Comme en Allemagne, les grandes entreprises sont majoritaires. En Italie, ce sont l'industrie chimique et le secteur de l'équipement électrique qui représentent la part la plus importante.

Bien souvent, le niveau des compétences et de l'expertise internes est important. Par exemple, l'entreprise multinationale Procter and Gamble a affecté 15 personnes dans le monde à la seule conduite d'ACV, et Dow Chemical et Volvo emploient chacune six personnes dans ce domaine (Atlantic Consulting *et al.*, 1996). Néanmoins, il n'est pas possible de tirer une conclusion générale valide concernant l'intensité.

BIOTECHNOLOGIES ET PRODUITS BIOTECHNOLOGIQUES

Par rapport à l'éventail des établissements commanditant des ACV, celui des groupes de produits couverts est relativement large (figure 4.9 de l'annexe).

◆ Annexe Figure 4.9. ACV par groupe de produits



En Allemagne, les groupes véhicules à moteur/pièces de véhicules à moteur/transports, produits chimiques et emballages revêtent une importance comparable (entre 36 et 46 ACV), et les groupes produits d'hygiène et de nettoyage et matériaux de construction sont également importants. En Suisse, le groupe des matériaux de construction est de loin le plus important (45 ACV), devant ceux de l'énergie et des emballages (respectivement 31 et 30 ACV). En Suède, la plupart des ACV ont été réalisées dans le secteur des emballages (27 études), devant ceux des véhicules à moteur, des matériaux de construction, de l'électronique et des déchets. En Italie, c'est le secteur des emballages qui vient en tête avec sept études.

Selon les études disponibles, il apparaît que la biotechnologie est sous-représentée dans les ACV. On en trouve néanmoins des exemples dans le domaine des lessives et des produits de nettoyage, où certaines substances (enzymes et agents tensio-actifs) ont été étudiées dans le cadre d'ACV portant sur les technologies de gestion des déchets et les matières premières renouvelables. Il convient toutefois de rappeler que seules les études publiées sont prises en compte dans cet examen, et que l'on suppose généralement que l'existence d'un grand nombre d'ACV internes n'est pas connue.

NOTES

1. Cet inventaire se fonde sur un projet conjoint lancé en juin 1996 par l'*Institut für ökologische Wirtschaftsforschung* (IÖW) et quatre autres instituts : *Ambiente Italia* (Milan), le *Gothenburg Research Institute* (Göteborg, Suède), l'*Institute for Prospective Technological Studies* (Séville, Espagne) et *Oekoscience* (Zurich). Il a pour titre « The use of LCA in business decision-making processes and its implications for environmental policy ». (L'utilisation de l'ACV dans les processus de prise de décisions des entreprises et ses implications pour la politique de l'environnement) et bénéficie d'un soutien dans le cadre du programme « Environnement et climat » de l'UE. Dans le cadre de ce projet, des données statistiques comparatives ont été recueillies pour l'Allemagne, l'Italie, la Suède et la Suisse.
2. Par exemple, fin 1991, la société américaine Franklin Associates avait mené environ 70 études, mais seules quatre d'entre elles sont connues. Selon l'OCDE, seulement 10 pour cent des études réalisées par Franklin Associates et seulement 5 pour cent de celles établies par la société de conseil française Écobilan sont accessibles au public (OCDE, 1995). Récemment, ces chiffres ont légèrement évolué : 30 à 60 pour cent des études d'ACV commandées par des entreprises sont aujourd'hui réservées à un usage interne (Atlantic Consulting *et al.*, 1996).
3. Pour la plupart des chercheurs actifs dans le domaine de l'ACV, le terme « produit » ne se limite pas aux produits matériels, mais englobe également les procédés et les services.

Annexe 4.4

BESOINS EN MATIÈRE DE RECHERCHE

BESOINS GÉNÉRAUX EN MATIÈRE DE RECHERCHE DANS LE DOMAINE DE LA MÉTHODOLOGIE DES ACV

L'exposé ci-après, consacré aux besoins en matière de recherche, s'appuie sur les travaux de LANCET Finnveden, 1996; LANCET Board et de Haes, 1996; et Wrisberg, 1997a.

Élucidation des liens entre l'ACV et les autres outils d'aide à la décision

Cette annexe présente une analyse des caractéristiques spécifiques et des utilisations des autres outils d'aide à la décision, examine à quel moment et pour quelles décisions il y a lieu de les employer et étudie l'éventuelle complémentarité entre l'ACV et les autres outils. En particulier, les points suivants sont abordés :

- principes de sélection du ou des outils les mieux appropriés;
- intégration et harmonisation de l'ACV avec les autres approches, notamment la « comptabilité verte » et d'autres types de définition d'objectifs, EMAS et ISO 14000;
- fécondation croisée des approches : est-il possible d'exploiter certains éléments de l'ACV dans d'autres contextes et *vice versa* ?

La mise au point d'outils combine les caractéristiques d'une « stratégie fondée sur le cycle de vie » et celles d'un « processus spécifique », tel qu'une étude d'impact sur l'environnement (EIE) de l'ensemble d'un système ou d'une chaîne de production ou une évaluation des risques sur la totalité du cycle. Le cas échéant, certains nouveaux outils intègrent des aspects économiques et sociaux dans la méthodologie de l'ACV, comme dans le cas de l'évaluation de la technologie (voir les définitions dans le chapitre 4). Les stratégies fondées sur le cycle de vie peuvent être appliquées à des systèmes plus complexes comportant une part d'incertitude liée aux éventuelles évolutions de la technologie, de la conception des produits, des attentes des consommateurs, etc., ainsi qu'à des analyses dynamiques, portant notamment sur la stabilité des flux de matières et la dépendance à l'égard de l'information et du financement.

DÉFINITION DE L'OBJECTIF ET DU CHAMP COUVERT : ANALYSE DE L'INVENTAIRE

Concernant la définition de l'objectif et du champ couvert, les principaux problèmes touchent aux choix (bien souvent normatifs) qu'il y a lieu d'opérer. Quels arguments étayent telle décision de négliger certaines catégories d'impacts, certaines limites du système, certains niveaux de qualité des données ou certaines hypothèses? Les motifs ne manquent pas : limites des applications, manque de données, nécessité de simplifier (indicateurs), etc. Comment déterminer les intrants et extrants pertinents, ainsi que les processus appropriés?

DÉVELOPPEMENT D'UNE APPROCHE ITÉRATIVE

Pour élaborer une approche itérative de l'ACV, il convient de développer plus avant les éléments suivants :

- Des méthodes de sélection, notamment des techniques « simples, rapides et peu onéreuses » qui dégagent des conclusions moins fouillées mais rationnellement fondées et répondant aux attentes des parties prenantes.

- Des méthodes de sélection liées au champ couvert. Est-il possible d'établir un lien entre les produits et services d'un secteur économique donné et les flux (environnementaux) élémentaires à considérer?
- Une analyse d'inventaire axée sur une évaluation de l'impact effectif, par le développement de méthodes d'inventaire permettant d'explorer les possibilités d'une approche retenant les incidences « au-dessus du seuil uniquement ».

LIMITES DES SYSTÈMES

La question essentielle est la suivante : quels processus et activités relèvent du système de production et lesquels appartiennent à l'environnement? On peut distinguer deux cas de figure :

- Les processus biologiques, tels que la sylviculture, peuvent être pris en compte comme relevant soit de l'environnement, soit du système économique. Dans le second cas, la lumière du soleil, le CO₂, l'H₂O, etc., constituent les apports de l'environnement, alors que dans le premier, c'est la biomasse qui représente l'apport.
- Les déchets mis en décharge peuvent être considérés comme relevant du système économique (les émissions et la production de méthane étant pris en compte comme une source d'énergie) ou de l'environnement (les déchets solides étant pris en compte comme un flux rejeté dans l'environnement).

Des recherches complémentaires doivent être menées concernant les points suivants :

- Critères permettant de déterminer si un processus appartient au système ou relève de l'environnement, notamment dans le cas des processus biologiques et de la gestion des déchets.
- Règles de décision simples pour l'intégration de processus de base, et critères ou méthodes de sélection pour l'estimation des processus prioritaires.
- Élaboration de modèles relatifs aux systèmes dans lesquels les matières sont recyclées par utilisation en cascade.
- Détermination du niveau de fixation du CO₂ par les matériaux produits à partir de ressources renouvelables, en fonction de la durée de vie des produits et de principes d'établissement des liens entre la fixation et les rejets de CO₂.
- Techniques d'élaboration de scénarios facilement applicables pour incorporer les évolutions du marché ou de la technologie dans les analyses d'inventaires. Dans la perspective d'une utilisation de l'ACV pour prévoir des situations futures, comment convient-il de définir les scénarios? Quelle est l'incidence de l'évolution des technologies et des parts de marché sur les résultats d'une ACV?

PRINCIPES EN MATIÈRE DE SÉLECTION ET DE QUALITÉ DES DONNÉES

Des travaux de recherche doivent être entrepris sur les questions méthodologiques suivantes :

- Élaboration d'une méthode d'évaluation de la qualité des données.
- Choix méthodologiques, notamment pour ce qui est des données relatives aux biens et services collectifs, tels que l'électricité, les transports, certains procédés de gestion des déchets (mise en décharge, incinération, compostage, etc.) et la production de produits de base (par exemple, les combustibles et les matériaux produits en grandes quantités, notamment ceux destinés à l'emballage). La principale question est la suivante : Les données de quels services collectifs convient-il de retenir, dans quelle situation, ou bien quelles moyennes faut-il employer?
- Critères pour l'utilisation de données de « premier plan » (par exemple, spécifiquement liées au système de produit) et « d'arrière-plan » (telles que les biens et services collectifs).
- Horizons temporels de la technologie : Pendant combien de temps peut-on considérer que les données restent représentatives?
- Aspects régionaux, par exemple pour ce qui est de l'origine des matières premières.

PROCÉDURES D'ATTRIBUTION

La question de l'attribution doit être étudiée plus en détail, et notamment les points suivants :

- Analyse de l'importance de l'attribution au niveau d'un système ou à celui d'un procédé, et élaboration de principes permettant de déterminer à quels moments l'attribution doit être faite à des procédés ou à des systèmes.
- Pertinence et cohérence des principes d'attribution et définition de critères pour l'utilisation d'un principe donné.
- Amélioration des procédures d'attribution fondées sur la qualité, des systèmes d'attribution (sélection, prévention de la production primaire, attribution en cascade, et notamment modélisation dynamique et non linéaire) et des principes d'attribution (physique, économique).

ÉVALUATION DE L'IMPACT DU CYCLE DE VIE (EICV)

Cadre et méthodologie de l'EICV pour différents domaines d'application, parties prenantes et bénéficiaires

La question de savoir si différentes applications nécessitent bel et bien autant de cadres et méthodes spécifiques d'EICV reste posée. Les efforts de recherche doivent donc viser à une meilleure compréhension des liens entre la méthodologie et l'application. Il n'est pas déraisonnable de supposer que les conditions valables pour un élément (par exemple, la caractérisation) peuvent varier si on utilise la caractérisation comme donnée d'entrée pour une méthode spécifique de pondération, ou si elle constitue l'aboutissement de l'EICV. Dans cette perspective, il peut alors être nécessaire, et possible, d'élaborer des cadres et méthodes en fonction du résultat final.

Indication de l'impact réel et non potentiel sur l'environnement

Pour bien cerner les types d'informations requis à chaque phase, on peut retenir une approche descendante dans laquelle on détermine tout d'abord le type de conclusions voulu au final, avant de définir à rebours l'évaluation de l'impact et l'analyse de l'inventaire.

Définition et sélection des catégories d'impacts

Le choix des catégories d'impacts est normatif, mais il doit néanmoins être cohérent avec la pondération. Par conséquent, il est important de mieux appréhender les liens entre les différents points de vue normatifs (tels qu'ils sont exprimés dans la pondération), les grandes catégories d'impacts et le choix de ces catégories d'impacts. Cela étant, il est également envisageable d'arrêter un choix normatif par suppression de catégories dans une liste unique par défaut. Dans ce cas de figure, il est uniquement nécessaire d'établir une liste par défaut.

Classification

Dans l'attribution d'impacts sur l'environnement à des flux de matières, les points suivants doivent être examinés :

- affectation d'impacts parallèles, en série, indirects et combinés;
- prise en compte des matières intermédiaires qui intègrent ou quittent le système étudié.

Caractérisation

Pour définir des méthodes et facteurs de caractérisation, un effort considérable de recherche systématique doit être entrepris, notamment sur les points suivants :

- choix des aspects à retenir dans les informations sur les impacts;
- prise en compte de la chaîne des causes et des effets;

- définition des effets dans la chaîne des causes et des effets;
- élaboration d'une méthode quantitative;
- calcul de facteurs de caractérisation;
- mise au point de méthodes de caractérisation, sur la base de définitions des effets étroitement liées aux domaines de protection;
- mise au point d'une méthode quantitative de caractérisation;
- élaboration d'une méthodologie pour l'ensemble des catégories d'impacts, avec prise en compte des informations spatiales;
- examen du caractère approprié et des implications de la prise en compte des informations d'arrière-plan;
- étude des implications et élaboration ultérieure d'un cadre modifié dans lequel l'analyse du devenir est distincte de celle des effets.

Les activités de recherche doivent être intensifiées, en particulier pour ce qui est des catégories d'impacts suivantes :

- établissement d'une classification et d'une caractérisation pour les « sols », qui prennent en compte différentes limites des systèmes et domaines de protection;
- élaboration de méthodes permettant de différencier les stocks de ressources biotiques et abiotiques, et évaluation des flux de matières;
- mise au point de méthodes spécifiques pour l'acidification et l'eutrophisation, notamment une analyse complète du devenir;
- établissement d'une classification et d'une caractérisation pour les impacts toxicologiques, prenant en compte différentes situations d'exposition;
- élaboration de méthodes pour les impacts non toxicologiques sur la santé humaine;
- amélioration de la classification et de la caractérisation de la formation d'oxydants photochimiques.

Pondération

Sachant que l'évaluation met en jeu des valeurs éthiques et idéologiques, et comme il est peu probable qu'un consensus se dégage sur ces valeurs dans une société démocratique ouverte, il paraît vraisemblable que l'on développera plusieurs méthodes d'évaluation et ensembles de facteurs de pondération. En outre, pour déterminer comment différents groupes de population évaluent divers aspects, il peut être utile d'employer divers ensembles de facteurs de pondération et méthodes d'évaluation dans des études de cas spécifiques.

Il est impératif d'évaluer le rôle de la pondération dans l'ACV par les actions suivantes :

- élaboration de procédures de pondération en recourant à des approches par panel;
- élaboration de méthodes de pondération fondées sur la valeur monétaire : estimation des coûts de protection ou d'assainissement de l'environnement, de remise en état des sols, ou d'adoption de systèmes antipollution intégrés;
- évaluation des possibilités de mise en œuvre et de l'acceptabilité de méthodes d'évaluation à l'aide d'une valeur physique unique, comme celles utilisées pour comparer divers éléments (énergie, utilisation de matières ou production) d'un même processus en termes de MJ ou de kg.

INTERPRÉTATION

Définition du rôle de l'interprétation

Le rôle de l'interprétation se définit par rapport aux autres aspects du cadre de l'ACV (la pondération, par exemple) et aux aspects externes. Pour l'heure, la question de l'évaluation de l'amélioration

n'a pas encore été précisée. Le rôle de l'interprétation dépendra très certainement de l'application visée, des parties prenantes et des bénéficiaires de l'étude, selon des modalités qui restent à déterminer. Par ailleurs, ce rôle pourra également varier selon les étapes déjà réalisées. Par exemple, il ne sera pas le même si aucune évaluation de l'impact n'a été conduite, ou si l'objectif de cette évaluation est la classification ou la caractérisation et qu'aucune pondération n'a été appliquée.

Élaboration de méthodes pour l'analyse de la sensibilité

L'analyse de la sensibilité doit inclure les données de l'analyse de l'inventaire, ainsi que tous les éléments quantitatifs de l'évaluation de l'impact. Les activités de recherche doivent considérer les méthodes existantes, notamment la simulation de Monte Carlo, ainsi que les spécifications relatives aux conditions préalables à la conduite d'une analyse de la sensibilité. Différents types de distribution statistiques doivent être envisagés. Les résultats peuvent ensuite être utilisés dans différents types d'analyses statistiques pour répondre à des questions telles que : la différence entre les systèmes A et B concernant le paramètre X est-elle significative du point de vue statistique ?

Élaboration de procédures pour l'analyse de l'incertitude

Concernant l'analyse de l'incertitude, les procédures doivent porter sur les points suivants :

- incertitudes méthodologiques liées aux choix concernant la définition, le champ couvert et l'analyse de l'inventaire (temps, espace, attribution, technologie, taille, valeur marginale/moyenne);
- incertitudes concernant la classification;
- incertitudes concernant la caractérisation liées aux méthodes, modèles et hypothèses;
- incertitudes associées aux différentes approches de la normalisation;
- analyse des incertitudes associées aux différentes méthodes de pondération et à la délimitation géographique.

Élaboration de méthodes pour l'analyse des dominantes

Une analyse des dominantes peut permettre d'identifier les contributions les plus importantes au résultat d'ensemble.

Élaboration de méthodes pour l'analyse marginale

Une analyse marginale fournit des informations sur les changements globaux imputables à une modification du cycle de vie. Ce type d'analyse peut conférer une importante valeur supplémentaire aux ACV. L'introduction de plusieurs scénarios (par exemple, que se passe-t-il si on remplace le procédé A par le procédé B?) produit un grand volume d'informations utiles, qu'il est intéressant d'exploiter en association avec une analyse des possibilités d'amélioration et avec de nombreuses autres applications de l'ACV.

BASES DE DONNÉES ET LOGICIELS

Les principes et conditions qui doivent présider à la création d'une base de données de qualité dotée des logiciels adéquats restent à préciser, mais devraient répondre aux besoins suivants :

- harmonisation des activités en cours du point de vue du format des données, de la nomenclature et de l'échange des données d'inventaire;
- mise en œuvre d'une évaluation de la qualité des données;
- procédure de mise à jour, notamment la définition des intervalles;
- élaboration de logiciels et de bases de données qui prennent en compte les dimensions spatiales et temporelles des flux en relation avec l'évaluation de l'impact.

On pourra recourir à des techniques avancées de modélisation et de conception de bases de données pour schématiser la configuration temporelle et spatiale des intrants et extrants environnementaux (par exemple, en associant l'ACV à des systèmes d'informations géographiques).

BESOINS DE RECHERCHE A L'INTERFACE ENTRE L'ACV ET LA BIOTECHNOLOGIE

En principe, il existe de bonnes raisons de procéder à des ACV portant sur les produits et procédés biotechnologiques. Le faible nombre d'ACV recensées à ce jour dans ce domaine s'explique par le développement encore insuffisant de cet instrument. Cela étant, diverses améliorations peuvent être apportées pour affiner cet outil ou l'adapter aux besoins spécifiques de la biotechnologie. Ainsi, il est nécessaire de surmonter plusieurs obstacles :

- Comme les produits et procédés biotechnologiques se fondent souvent sur des ressources renouvelables, certaines questions se posent concernant l'interprétation de ces dernières, l'utilisation des terres agricoles et l'allocation des crédits de CO₂.
- Dans bien des cas, les données de référence concernant la production biotechnologique sont insuffisantes. L'accès à des informations essentielles est bloqué parce que les sociétés spécialisées dans la biotechnologie refusent souvent de les communiquer pour des raisons de secret industriel et de stratégie.
- Il est extrêmement rare que l'on dispose d'informations suffisantes sur les flux d'énergie et les flux massiques.
- Les paramètres propres aux procédés, tels que le type et le volume des émissions dans l'atmosphère, l'eau et le sol, ne sont pas aisément accessibles.
- Il est difficile de tirer des enseignements généraux ou d'appliquer les conclusions tirées d'un procédé de production biotechnologique à un autre, la majorité de ces procédés présentant pour l'heure un caractère « unique ».

Dans la comparaison d'un procédé biologique et d'un procédé « classique », plusieurs problèmes se posent :

- Outre les détails techniques, quels aspects faut-il aborder (par exemple, l'opinion publique)?
- Il est difficile de définir des limites claires, et celles-ci donnent souvent lieu à discussion.

Les avantages de l'ACV pour les produits et procédés biotechnologiques tiennent à la possibilité de se concentrer sur les éléments de la chaîne production/consommation qui sont effectivement pertinents pour une comparaison en termes d'environnement, c'est-à-dire qui déterminent les différences écologiques entre les options comparées. On ouvre ainsi une possibilité d'optimiser les procédés examinés sur ces points particuliers.

Concernant l'interprétation des résultats, un débat général est en cours, ce qui signifie que cette question ne relève pas exclusivement du domaine de la biotechnologie.

Annexe 6

POLITIQUES ET LÉGISLATIONS AU CANADA, AU JAPON ET EN ALLEMAGNE

CANADA

En 1993, les autorités fédérales et provinciales ont annoncé par la voix du Conseil canadien des ministres de l'Environnement « Un engagement national pour la prévention de la pollution », motivé par le fait que la prévention de la pollution est un élément essentiel de la politique en faveur du développement durable et qu'elle contribuera à la durabilité à long terme en associant protection de l'environnement et efficacité économique. Actuellement, le Canada élabore une stratégie nationale d'action pour la prévention de la pollution. La prévention de la pollution recouvre essentiellement le recours à des procédés, pratiques, matériaux et types d'énergie qui évitent ou minimisent la création de polluants et de déchets.

On s'accorde à reconnaître que les méthodes de prévention de la pollution varieront selon les secteurs industriels. Dans le cas du secteur manufacturier, il devrait s'agir d'innovations permettant d'éviter l'utilisation ou la création de polluants grâce à la substitution de matières premières ou à l'adoption de procédés en circuit fermé permettant le recyclage à l'intérieur de l'unité de production.

Le *Conference Board* du Canada (CBC) a indiqué que les facteurs favorisant la participation de l'industrie aux initiatives en faveur de l'environnement sont : une réglementation imminente ou prévue, des économies de coûts, des gains d'efficacité, la rentabilité de l'investissement, la perspective de conquérir des parts de marché et l'image auprès du public (CBC, 1996).

En matière de produits chimiques toxiques et de gestion des déchets, la politique du Canada évolue vers un modèle de prévention de la pollution privilégiant l'amélioration des procédés de façon à éviter les problèmes, de préférence à un modèle de correction *a posteriori*. Cette orientation transparaît dans la législation, les programmes volontaires et les incitations économiques. Les autorités gèrent et réglementent les substances toxiques à tous les stades de leur cycle de vie.

Les autorités du Canada, à tous les échelons, ont entrepris une action législative et réglementaire visant à maîtriser l'utilisation des substances toxiques et leur impact sur l'environnement. Aux termes de la loi canadienne sur la protection de l'environnement (LCPE), les substances toxiques doivent être gérées à chaque stade de leur cycle de vie de façon à réaliser des objectifs spécifiques. Certaines substances toxiques particulières ont été définies comme prioritaires pour les évaluations écologiques et sanitaires, et peuvent l'être également à des fins de réglementation. La LCPE impose en outre que toute substance « nouvelle » (c'est-à-dire ne figurant pas dans la liste des substances nationale) fasse l'objet d'une notification et subisse une évaluation de son innocuité pour l'environnement et la santé humaine avant d'être importée ou fabriquée au Canada; cela vaut également pour les « nouvelles » substances issues de la biotechnologie.

Par ailleurs, la LCPE prévoit l'établissement d'un inventaire national des rejets de polluants, en vertu de quoi les entreprises répondant à certains critères sont tenues de collecter et de communiquer aux autorités des informations sur les rejets de certaines substances dans l'atmosphère, l'eau et le sol.

Énergie

Au Canada, la consommation d'énergie par habitant est plus importante que dans la plupart des autres pays industrialisés, car la rigueur du climat, l'appareil industriel à forte intensité énergétique

(pâtes et papiers, sidérurgie, mines, etc.), l'étendue du territoire et la faible densité de population concourent à une demande élevée de services de transports et à une faiblesse relative des services énergétiques. De nombreux aspects de la production et de la consommation d'énergie, de la prospection à la consommation finale, peuvent avoir une incidence sur la santé humaine et l'environnement. De ce fait, un certain nombre d'initiatives du gouvernement fédéral, généralement de nature volontaire, ont évolué dans le sens :

- d'une réduction de la circulation routière;
- d'un renforcement des mesures de protection;
- d'une amélioration de la qualité de l'environnement;
- d'une amélioration de l'efficacité économique des ressources;
- d'une meilleure qualité de vie.

Ces initiatives s'appuient sur des programmes et des propositions de modifications touchant l'infrastructure des transports, la gestion de la demande, la gestion du trafic, les technologies moins polluantes, l'éducation et la sensibilisation, la gestion des transports publics, et la structure et l'aménagement des villes.

Air

Concernant la réduction des émissions atmosphériques, le Canada a signé le Protocole de Montréal en 1987 et mis en œuvre un programme de surveillance aux fins de protection de la couche d'ozone. Aux termes du Protocole, le principal objectif est l'élimination progressive des substances appauvrissant la couche d'ozone. Le calendrier actuel prévoit l'élimination pour 2010 des usages des hydrocarbures partiellement chlorofluorés (HCFC) ne donnant pas lieu à récupération, l'élimination du HCFC-22 dans les nouveaux équipements pour 2010, ainsi qu'une réduction de 25 pour cent de la consommation de bromure de méthyle d'ici à 1998 avant son élimination complète en 2010. Le contrôle de ces substances est assuré dans le cadre du Règlement sur les substances appauvrissant la couche d'ozone de la LCPE. Un deuxième règlement relatif aux substances appauvrissant la couche d'ozone régit le contrôle des produits manufacturés contenant des substances détruisant l'ozone, tels que les aérosols et les emballages alimentaires en mousse plastique. Des codes de bonne pratique ont également été élaborés pour l'élimination des émissions d'hydrocarbures fluorés par les systèmes de réfrigération et de climatisation et pour les hydrocarbures halogénés.

Il existe par ailleurs des programmes de réduction des risques qui visent à abaisser de 50 pour cent les émissions de dioxyde de soufre et à plafonner les émissions liées aux pluies acides dans la partie orientale du Canada.

Substances toxiques

En 1994, les autorités fédérales ont lancé une nouvelle stratégie définissant l'orientation de toutes les initiatives fédérales dans le domaine des substances toxiques. La Politique de gestion des substances toxiques, qui se fonde sur les principes du développement durable et de la prévention de la pollution, met l'accent sur la nécessité d'une action préventive et sur l'importance des approches de précaution dans la gestion des substances toxiques. Le Plan d'action contre les substances chlorées, qui se propose d'éliminer virtuellement toutes les substances chlorées, s'inscrit dans le cadre de cette politique.

Politique fédérale de gestion des substances toxiques

Pour les substances les plus dangereuses, l'objectif est de les éliminer totalement de l'environnement, alors que pour les autres, il s'agit plutôt de mettre en place un effort de gestion sur l'ensemble du cycle de vie de façon à prévenir ou minimiser leur rejet dans l'environnement. À l'échelon national, les actions sont coordonnées en premier lieu par le biais du Processus des options stratégiques d'Environnement Canada, qui s'efforce de définir les options de gestion avec la participation des

parties prenantes et ménage en outre des possibilités de coopération avec les provinces pour la détermination des priorités et des méthodes de gestion. La méthode privilégiée de gestion est la prévention de la pollution, mais la politique reconnaît la nécessité d'une action dans les domaines suivants :

- lutte efficace contre la pollution imputable aux sources nationales;
- lutte à l'échelle internationale contre la pollution atmosphérique à longue distance provenant de sources étrangères;
- mesures curatives pour prendre en charge les substances déjà présentes dans l'environnement du Canada.

La Politique fédérale de gestion des substances toxiques retient 13 substances en vue d'une élimination quasi totale compte tenu de leur caractère persistant, toxique et susceptible de bio-accumulation. Toutes sont hautement chlorées. Les dispositions adoptées imposent aux producteurs ou utilisateurs de ces substances de veiller à ce que les rejets restent en deçà du niveau mesurable, et d'élaborer des plans de gestion aux fins d'élimination des émissions de ces substances sur la base d'une analyse des risques, des coûts et des avantages.

Plan d'action contre les substances chlorées

Adopté en 1994 dans le cadre de la Politique de gestion des substances toxiques, le Plan d'action contre les substances chlorées préconise une gestion de l'ensemble du cycle de vie de toutes les substances préoccupantes rejetées dans l'environnement. De nombreuses substances contenant du chlore relèvent de cette catégorie. Le Plan d'action recommande l'adoption de mesures visant en priorité les usages et les produits critiques, ainsi que l'élimination des substances chlorées les plus nocives, selon une approche sectorielle de la gestion des substances chlorées complétée par des accords de performances environnementales passés avec les secteurs industriels clés.

Aux termes du Plan d'action, neuf substances chlorées ont été retenues pour une réduction massive dans le cadre de l'initiative ARET, avec un objectif de diminution de 98 pour cent par rapport au niveau de 1988 en 1995, et de 99 pour cent en 2000. Par ailleurs, les émissions de 24 autres substances chlorées, qui s'élevaient à plus de 3.26 millions de kilogrammes au cours de l'année de référence, ont été réduites de 67 pour cent en 1995, et cette baisse devrait atteindre 81 pour cent en 2000. Plusieurs secteurs, qui ont signé des protocoles d'entente avec les autorités, participent au programme ARET : l'industrie automobile, le secteur des équipements automobiles, le secteur du nettoyage à sec, le secteur du PVC, les industries graphiques et les industries utilisant des colorants et pigments au chloranil.

Déchets

La plupart des autorités provinciales ont adopté une législation visant à réduire la production de déchets dangereux. Les flux de déchets ciblés varient selon les provinces. Ainsi, la Colombie britannique a lancé une action pour favoriser le recyclage des matières plastiques et réduire leur présence dans les flux de déchets, tandis que le Québec a élaboré un nouveau code de bonne pratique concernant la mise en décharge des déchets solides et la gestion des gaz dans le cadre de la Convention sur les changements climatiques, avec pour objectif de réduire les émissions de méthane.

L'Accord nord-américain de coopération dans le domaine de l'environnement, signé dans le cadre de l'Accord de libre-échange nord-américain (ALENA), est une initiative trilatérale, entrée en vigueur en janvier 1994, dont l'objectif est d'intégrer les préoccupations dans les domaines du développement et de l'environnement.

La répartition des responsabilités en matière de développement durable est complexe au Canada. En effet, si c'est le gouvernement fédéral qui mène les négociations sur les traités internationaux au nom du pays, les questions d'environnement et de développement durable relèvent de la responsabilité tant des autorités fédérales que provinciales.

Effet positif des réglementations et politiques

La stratégie fédérale de prévention de la pollution (La prévention de la pollution : Une stratégie fédérale de mise en œuvre) encourage les entreprises à abandonner les solutions en bout de chaîne au profit de la prévision et de la prévention des dommages à l'environnement. Elle a ainsi conduit à la mise au point de procédés, technologies et produits nouveaux qui allègent les pressions sur l'environnement.

Les produits et procédés moins polluants sont ceux qui consomment moins d'énergie et de ressources matérielles, génèrent moins de pollution ou de déchets, ou sont alimentés par des ressources renouvelables en remplacement de produits de départ à base de pétrole ou de charbon. De nombreux facteurs peuvent inciter un exploitant à opter pour des produits et procédés moins polluants, et notamment les suivants :

- disponibilité des matières premières;
- éléments de coût;
- exigences du marché;
- considérations de sécurité et de santé;
- protection de l'environnement;
- responsabilité du fait des produits;
- image auprès du public.

Les facteurs présentés dans la liste ci-dessus ne sont pas classés dans un ordre particulier, mais il est clair que le souci de protection de l'environnement n'est qu'une considération parmi beaucoup d'autres susceptibles d'orienter une industrie vers de nouveaux produits et procédés. Les modifications de produits sont plus courantes (parmi les exemples connus, citons l'élimination progressive des substances appauvrissant la couche d'ozone – tels que les CFC, le tétrachlorure de carbone et le méthylchloroforme – dans le cadre du Protocole de Montréal et le recours aux encres d'imprimerie à base d'huiles végétales) que les modifications de procédés, qui impliquent d'ailleurs le plus souvent que l'on modifie les produits. Par ailleurs, les motivations varient selon les cas, comme l'illustrent les études de cas suivantes qui portent essentiellement sur des modifications des procédés :

- introduction de l'électrode à stabilité dimensionnelle dans la production de chlore et de soude;
- élimination progressive de la cellule d'électrolyse au mercure dans la production de chlore et de soude;
- utilisation du dioxyde de chlore en remplacement du chlore élémentaire dans le blanchiment des pâtes et papiers;
- utilisation de systèmes de nettoyage à base d'eau en remplacement des solvants à base d'hydrocarbures chlorés;
- utilisation du procédé de fermentation en remplacement du procédé pétrochimique pour la production d'éthanol.

Études de cas

Introduction de l'électrode à stabilité dimensionnelle dans la production de chlore et de soude

Dans le passé, l'emploi d'électrodes de graphite dans la production de chlore et de soude donnait lieu à la formation d'un certain nombre de sous-produits indésirables, tels que l'octachlorostyrène et l'hexachlorobenzène. Depuis l'adoption de l'électrode métallique à stabilité dimensionnelle, le phénomène a quasiment été éliminé.

L'adoption de ces nouvelles électrodes par les industriels n'est pas le fruit d'une action spécifique des autorités, réglementaire ou autre, mais bien plus le résultat d'une combinaison de la plupart des facteurs mentionnés ci-avant, notamment économiques. En effet, la durée de vie plus importante de la nouvelle électrode a permis des économies de coût significatives.

Élimination progressive de la cellule d'électrolyse au mercure dans la production de chlore et de soude

Indéniablement, cette modification majeure des procédés est le résultat direct des réglementations adoptées au cours des années 70 dans le cadre de la loi sur les pêches qui visaient à réduire les quantités de mercure rejetées dans les lacs et cours d'eau. D'autres dispositions adoptées par la suite dans le cadre de la LCPE sont venues réglementer les volumes de mercure rejetés dans l'atmosphère. Bon nombre des anciens sites équipés de cellules d'électrolyse au mercure ont été fermés et remplacés par des usines dotées de cellules à diaphragme ou à membrane.

Au Canada, seule une petite usine utilise encore aujourd'hui le procédé de la cellule au mercure. Dans ce domaine, le Canada est grandement en avance sur les États-Unis et surtout sur l'Europe, où près de la moitié des sites de production de chlore et de soude utilisent toujours la cellule au mercure. Ce exemple met clairement en évidence l'impact positif que peut produire une réglementation environnementale ferme en matière de promotion des procédés moins polluants.

Utilisation du dioxyde de chlore en remplacement du chlore élémentaire dans le blanchiment des pâtes et papiers

L'élimination progressive du chlore élémentaire dans le blanchiment des pâtes au profit du dioxyde de chlore et, dans une moindre mesure, du peroxyde d'hydrogène, de façon à prévenir la formation de dioxines et de furannes, est souvent mise au crédit de la révision des dispositions de la loi sur les pêches et des nouvelles dispositions adoptées dans le cadre de la LCPE.

Cela étant, deux autres facteurs au moins ont joué un rôle dans la décision de l'industrie canadienne des pâtes et papiers d'investir des milliards de dollars dans l'adoption de nouveaux procédés de blanchiment. Premièrement, de nombreux clients des États-Unis exigent à tout prix des pâtes sans dioxines ni furannes, de façon à pouvoir se prévaloir du caractère écologique des produits qu'ils commercialisent. Deuxièmement, le marché allemand réclame de plus en plus des produits papiers garantis sans chlore, tandis que le marché mondial exige des produits au minimum garantis sans chlore élémentaire pour contribuer au développement durable.

Utilisation de systèmes de nettoyage à base d'eau en remplacement des solvants à base d'hydrocarbures chlorés

L'adoption, ces dernières années, de procédés de nettoyage principalement à base d'eau en remplacement des solvants de dégraissage à base d'hydrocarbures chlorés est en grande partie à mettre au compte d'une action volontaire de la part de l'industrie. En la matière, l'industrie automobile a montré l'exemple puisque la Société des constructeurs de véhicules à moteur a signé un protocole d'entente avec les autorités fédérales et celles de l'Ontario.

Si la LCPE reconnaît la toxicité des principaux solvants chlorés utilisés, le trichloréthylène et le tétrachloréthylène, il n'existe aucune restriction légale à leur utilisation au Canada. L'industrie aéronautique canadienne, qui estime ne pas pouvoir se passer des solvants chlorés, reste d'ailleurs un utilisateur relativement important de ces produits. Toutefois, dans le cadre du Processus des options stratégiques, d'importantes réductions de l'emploi des solvants chlorés pour le dégraissage ont été négociées avec l'industrie.

Utilisation du procédé de fermentation en remplacement du procédé pétrochimique pour la production d'éthanol

Le Programme national sur l'éthanol de la biomasse vise à accroître l'utilisation de l'éthanol produit par la fermentation de la biomasse, en remplacement des combustibles classiques tirés du pétrole, dans les applications de production d'énergie. Cette évolution, qui à l'évidence répond parfaitement à la définition d'un procédé moins polluant, est le résultat direct de la politique mise en œuvre par le gouvernement pour promouvoir l'utilisation des ressources renouvelables. Cela étant, il

est difficile de savoir si cette stratégie répond à des considérations écologiques ou si elle est inspirée par la volonté de créer de nouveaux marchés pour les produits agricoles existants. Le coût de production de l'éthanol selon cette méthode est deux fois supérieur à celui de la production des produits pétrochimiques équivalents.

Quoi qu'il en soit, l'annonce récente de la création d'un nouveau site en Alberta pour la production d'oxyde de méthyle et de tert-butyle à partir d'orge et de butane confirme la réalité des évolutions induites dans les procédés par la politique du gouvernement. Cet additif de l'essence est déjà produit en Alberta à partir de produits d'alimentation pétrochimiques.

Point de vue de l'industrie

L'industrie souligne à juste titre qu'outre l'action des pouvoirs publics, de nombreux autres facteurs poussent à l'adoption de produits et procédés moins polluants. En particulier, l'industrie a pris de nombreuses initiatives en réponse à la sensibilisation du public aux questions d'environnement bien plus que du fait d'actions spécifiques des pouvoirs publics. Ces initiatives ont été adoptées sous l'impulsion d'ONG de défense de l'environnement et des médias. Par conséquent, on peut conclure que l'effet combiné de la prise de conscience du public et de la perspective d'une action législative conduit l'industrie à adopter progressivement des stratégies en matière d'environnement. L'élimination responsable des déchets est un exemple classique d'incitation économique appliquée dans le contexte social approprié. En effet, de par son seul coût, l'élimination responsable des déchets a créé une puissante incitation économique en faveur de la réduction des déchets. Au Canada, les autorités municipales et provinciales, qui ont la charge de l'élimination des déchets, ont joué un rôle majeur en créant un climat économique favorable à des mesures de réduction des déchets.

La législation peut être le moteur du développement de produits et procédés moins polluants lorsque leur mise au point ou leur adoption entraîne un coût trop élevé pour qu'une entreprise quelconque en prenne l'initiative. En effet, lorsque toutes les entreprises en concurrence sont obligées d'adopter une même mesure, comme cela a été le cas pour le remplacement des CFC par des hydrocarbures partiellement chlorofluorés comme agent d'expansion des mousses d'isolation, la législation crée un contexte d'égalité de concurrence.

Au nombre des autres initiatives de l'industrie figure la fabrication de produits tels que des caches en ruban sans solvants organiques.

Initiatives volontaires

Les initiatives volontaires dans le domaine de l'environnement se multiplient au Canada depuis plusieurs années déjà, sous des formes diverses telles que des conventions entre secteurs industriels, organisations non gouvernementales et pouvoirs publics. Ces actions sont sous-tendues par l'idée que les approches réglementaires traditionnelles (c'est-à-dire législatives) ne constituent pas toujours la meilleure méthode pour atteindre les objectifs fixés. Le *Conférence Board* du Canada a identifié certains facteurs motivant les initiatives volontaires :

- l'imminence ou la perspective d'une réglementation;
- les économies de coûts ou les gains d'efficacité (court terme);
- la perspective d'améliorer la part de marché et l'image auprès du public (long terme).

Le plus souvent, les initiatives volontaires sont considérées comme des compléments à la réglementation, avec à la clé un large éventail d'interactions entre les deux. En matière d'initiatives volontaires, l'une des principales difficultés est d'atteindre les petites et moyennes entreprises, tâche assurée en premier lieu par les programmes des autorités provinciales.

ARET

L'industrie a également adopté des initiatives volontaires en soutien de dispositifs légaux. Ainsi, le programme Accélération de la réduction et de l'élimination des toxiques (ARET) est une initiative

conjointe de l'industrie et des pouvoirs publics visant à diminuer ou supprimer les émissions de quelque 100 substances par la mise en œuvre d'actions volontaires. L'une des pièces maîtresses de cette initiative est l'élimination ou la réduction progressive des substances toxiques persistantes ou susceptibles de bio-accumulation.

Lancé en 1994, ce programme regroupe aujourd'hui 278 établissements de huit secteurs industriels majeurs représentant plus de 40 pour cent de la production industrielle totale du Canada. L'objectif à court terme du programme est une réduction de 90 pour cent par rapport aux niveaux de 1988 des émissions toxiques persistantes susceptibles de bio-accumulation et de 50 pour cent d'ici l'an 2000 pour toutes les autres substances toxiques recensées. Le programme ARET porte sur 117 substances toxiques.

JAPON

Le Japon s'est doté d'un programme national assorti d'une législation spécifique pour traiter les questions des effets sur l'environnement au sens le plus large. Au sommet de cette structure se trouve la loi fondamentale sur l'environnement, qui a été modifiée au fil du temps en fonction de l'évolution des points de vue nationaux et internationaux sur la protection et la conservation de l'environnement et de l'intégration croissante des questions d'environnement dans d'autres domaines. La loi fondamentale sur l'environnement, telle qu'elle a été modifiée pour tenir compte des objectifs du programme Action 21 adopté par Conférence des Nations Unies sur l'environnement et le développement (CNUED), est précisée par deux textes : le Plan d'action national pour la mise en œuvre d'Action 21 et le Plan fondamental pour l'environnement.

En dessous des objectifs d'ensemble, une législation détaille les objectifs propres à chaque aspect spécifique de la protection de l'environnement ou de la santé : la loi sur la prévention de la pollution atmosphérique, la loi sur la prévention de la pollution de l'eau et la loi sur la répression des délits liés à la pollution pouvant porter préjudice à la santé humaine.

A ce deuxième niveau, d'autres textes plus spécifiques régissent les aspects propres à l'industrie ou la société, comme la loi sur le contrôle et la réglementation de la fabrication, etc., des substances chimiques (loi sur le contrôle des substances chimiques) et la loi réglementant l'utilisation des substances chimiques dans l'agriculture.

La politique japonaise identifie sans ambiguïté les modes de vie comme un agent responsable de la pollution et de la dégradation de l'environnement. Elle considère donc qu'une évolution des modes de vie est une condition *sine qua non* pour la réalisation des objectifs du programme Action 21, en particulier dans le Programme d'action pour arrêter le réchauffement planétaire. Élaboré en 1991 pour la période 1991-2001, le Programme d'action consacre une section à la réduction des émissions de CO₂, qui recense cinq points liés au mode de vie : la mise au point de matériaux et produits recyclables, les excès en matière d'emballage et de distribution, la mise au point et la diffusion de produits à faibles émissions de CO₂, l'adaptation des horaires à l'éclairage naturel et l'utilisation efficiente de l'énergie. Le Plan fondamental pour l'environnement (1993) attribue à la participation du public à tous les niveaux de la société un rôle essentiel. Il souligne également la nécessité de mettre un terme au gaspillage et de repenser les valeurs et comportements. Enfin, il fait valoir que chaque secteur doit volontairement et activement participer aux efforts visant à utiliser avec sagesse l'environnement et à alléger les pressions qu'il subit.

C'est en 1967 que le Japon a adopté la loi fondamentale sur l'environnement qui a ensuite été modifiée à plusieurs reprises, dont la plus récente remonte à 1993. L'article 1 de cette loi définit son objectif : «L'objectif de la loi est de promouvoir systématiquement et globalement les politiques en faveur de la conservation de l'environnement et, partant, de contribuer à un mode de vie sain et épanouissant pour la génération actuelle et les générations futures du pays et au bien-être des populations par l'adoption de principes fondamentaux, ainsi que de préciser les responsabilités incombant respectivement à l'État, aux collectivités locales, aux entreprises et aux personnes en matière de conservation de l'environnement et de déterminer les points essentiels des politiques de protection de l'environnement».

Suite à sa modification intervenue en 1993, la loi fondamentale vise désormais à mettre en œuvre, au niveau national, les objectifs de la CNUED. A cet égard, le texte fait de nombreuses références aux points du programme Action 21, notamment le réchauffement planétaire, l'appauvrissement de la couche d'ozone, la pollution marine et le recul de la diversité biologique. Son article 4 fait état du développement durable et de la nécessité de réduire la contrainte qui pèse sur l'environnement. Conformément aux dispositions de l'article 15, le gouvernement japonais a publié un Plan fondamental pour l'environnement en 1994. En l'occurrence, il s'agit d'un texte élargi qui définit les stratégies adaptées à la réalisation de quatre objectifs à long terme :

- mettre en place un système socio-économique favorisant des cycles de matières respectueux de l'environnement et minimisant la pression exercée sur l'environnement du fait des activités humaines;
- assurer une coexistence harmonieuse entre l'homme, la faune et la flore sauvages et l'environnement naturel;
- veiller à la participation de tous les membres de la société aux activités de conservation de l'environnement (l'expression japonaise traduite par « conservation de l'environnement » recouvre à la fois la protection et l'amélioration de l'environnement);
- renforcer les activités internationales.

Le Plan fondamental pour l'environnement définit les concepts fondamentaux et les objectifs à long terme de la politique de l'environnement pour le XXI^e siècle.

Conformément à son Plan d'action pour la mise en œuvre d'Action 21, le Japon identifie des objectifs spécifiques qui ont une incidence sur les produits et procédés industriels. Ces objectifs sont regroupés par catégories, telles que la protection et la promotion de la santé humaine, et des sous-sections sont consacrées à la santé en zone urbaine et aux polluants et risques pour l'environnement.

Énergie

L'un des thèmes centraux du Plan d'action pour la mise en œuvre d'Action 21 est la viabilité écologique dans le domaine de l'énergie. Il décrit l'énergie comme « un élément d'interface entre la conservation de l'environnement et la croissance économique », et laisse entendre que la réalisation de l'objectif du développement durable impose une réforme en profondeur de la structure de l'offre et de la demande d'énergie.

A cet égard, le Japon a adopté plusieurs lois visant à réduire les pressions sur l'environnement liées à la production, la distribution et l'utilisation d'énergie. La plus importante de ces dispositions porte sur la promotion du développement et de l'introduction d'énergies de substitution.

Le Plan d'action recommande l'intégration des questions d'environnement et de développement dans les processus de prise de décision et met en place un dispositif juridique en ce sens. Le système a été instauré en 1993 dans le cadre de la loi fondamentale sur l'environnement qui, outre l'affirmation des principes fondamentaux, contient des dispositions permettant l'élaboration du Plan fondamental pour l'environnement, de normes de qualité de l'environnement et de mesures d'ordre réglementaire et économique.

Par ailleurs, le Plan fondamental pour l'environnement définit des objectifs précis en matière de protection de l'air, de protection de la qualité des ressources en eau douce et des approvisionnements en eau, et de gestion écologiquement rationnelle des produits chimiques toxiques et des déchets solides et dangereux.

Air

Concernant la protection de la qualité de l'air, le Plan d'action pour la mise en œuvre d'Action 21 prévoit une stabilisation des émissions japonaises de gaz à effet de serre par application d'un Programme d'action (une politique) pour arrêter le réchauffement planétaire (octobre 1990). Par ailleurs, en janvier 1993, le Japon a signé la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements

climatiques, aux termes de laquelle il s'efforcera de stabiliser ses émissions de dioxyde de carbone par habitant et l'ensemble de ses émissions aux niveaux de 1990 d'ici l'an 2000. Concernant les émissions de méthane, l'objectif fixé est celui d'une stabilisation aux niveaux de 1990.

Plusieurs domaines d'action sont recensés : la fourniture d'énergie, la structure de la production industrielle et les modes de vie. Par ailleurs, le Plan d'action fait valoir que le développement de technologies innovantes constitue une stratégie fonctionnelle pour stabiliser ou réduire les émissions du CO₂, notamment dans le secteur de la production d'énergie et pour ce qui est de la fixation du CO₂. Le Programme d'action de 1990 identifie plusieurs secteurs cibles prioritaires pour la mise en œuvre de ses dispositions (industries manufacturières, agriculture, sylviculture, pêche, construction), et préconise en outre l'introduction de sources d'énergie à émissions de CO₂ faibles ou nulles.

Le Japon a adopté plusieurs lois aux fins de réalisation des objectifs de mise en valeur de l'énergie et de rendement énergétique dans le cadre du développement durable. Concernant le développement industriel et l'utilisation d'énergie, un programme d'action volontaire est ainsi préconisé pour réduire la consommation d'énergie. Diverses dispositions réglementant les émissions de dioxyde de soufre et d'oxydes d'azote ont été adoptées dans le cadre de la loi sur la lutte contre la pollution, de même que certaines initiatives promouvant les économies d'énergie par le biais du recyclage. L'adhésion à la Convention de Vienne pour la protection de la couche d'ozone et au Protocole de Montréal relatif à des substances qui appauvrissent la couche d'ozone correspond à un second domaine d'activité. En 1989, le pays a ainsi voté la loi sur la protection de la couche d'ozone par un contrôle de certaines substances et d'autres mesures.

Eau

Le programme Action 21 vise aussi à protéger la qualité de l'approvisionnement en eau par la protection et la conservation des ressources en eau. Cette stratégie préconise l'utilisation efficace et rationnelle des systèmes d'assainissement des eaux usées, notamment industrielles. La loi fondamentale sur l'environnement et la loi sur la lutte contre la pollution de l'eau définissent le niveau de qualité souhaitable de l'eau par le biais de normes concernant les effluents et imposent des mesures de contrôle des rejets par la mise en œuvre d'une épuration appropriée des eaux usées provenant de sources urbaines ou industrielles.

Concernant la qualité de l'eau dans les zones agricoles et rurales, la loi réglementant l'utilisation des substances chimiques dans l'agriculture établit des normes pour le retrait de l'homologation des produits agrochimiques, en fonction des risques de pollution hydrique qu'ils présentent. Cette disposition s'applique également aux activités liées aux engrais et à la mise au point d'engrais non sujets au ruissellement. Enfin, la politique suivie préconise des actions visant au développement d'initiatives technologiques faisant appel aux fonctions naturelles d'assainissement des écosystèmes pour épurer l'eau.

Substances toxiques

La politique relative aux substances chimiques toxiques prévoit d'étendre et d'accélérer l'évaluation des risques chimiques par un large éventail d'initiatives. L'une d'elles est le plan d'action de l'OCDE pour l'évaluation des substances chimiques produites en grandes quantités (1 000 tonnes ou plus produites dans un même pays). Par ailleurs, le Forum intergouvernemental sur la sécurité des produits chimiques recommande l'évaluation de 500 substances chimiques produites en grandes quantités d'ici l'an 2000.

Adoptée en 1973 puis modifiée en 1986, la loi sur le contrôle des substances chimiques stipule que toute nouvelle substance fabriquée ou importée au Japon doit être déclarée aux autorités compétentes, et que certaines de ses caractéristiques doivent être examinées (biodégradation, bio-accumulation et toxicité chronique). En 1996, 320 substances nouvelles ont été déclarées au titre de cette loi. Les substances dont les quantités produites ou importées sont inférieures à 1 tonne par an sont soumises à un autre type de notification. En 1996, plus de 8 000 substances ont fait l'objet d'une notification dans ce cadre.

Toujours dans le cadre de la loi sur le contrôle des substances chimiques, on examine les propriétés de biodégradation, de bio-accumulation et de toxicité chronique des substances chimiques existantes afin de les classer par catégories (substances spécifiées de Classe I, substances spécifiées de Classe II ou substances désignées). Les substances spécifiées de Classe I présentent des qualités de biodégradation médiocres, un potentiel de bio-accumulation élevé et une certaine toxicité chronique. Celles de la Classe II présentent elles aussi des qualités de biodégradation médiocres et une certaine toxicité chronique, mais elles ne s'accumulent pas dans les organismes vivants. Enfin, les substances désignées présentent une biodégradation médiocre, ne s'accumulent pas dans les organismes vivants, et l'on suspecte chez elles une toxicité chronique. En novembre 1996, 1 087 substances chimiques existantes avaient été examinées : neuf avaient été inscrites en Classe I, 23 en Classe II et 13 comme substances désignées.

Déchets

Au Japon, la gestion des déchets est réglementée depuis 1970 par la loi sur la gestion des déchets et l'assainissement public (loi sur la gestion des déchets). En 1992, celle-ci a été complétée par des mesures visant à limiter la production de déchets et à promouvoir le tri et le recyclage. Plus particulièrement, ces modifications portent sur la promotion de la réduction des déchets, la planification de l'élimination, avec notamment la possibilité d'imposer des plans de gestion des déchets aux installations municipales produisant d'importants volumes de résidus urbains solides (RUS), la réglementation de la manutention et du traitement des déchets, la désignation de déchets soumis à un contrôle spécifique, et la définition des déchets désignés. La catégorie des déchets désignés comprend par exemple les pneus, les téléviseurs, les réfrigérateurs et les matelas à ressorts.

La loi visant à promouvoir l'utilisation de ressources recyclables (la loi sur le recyclage d'avril 1991), entrée en vigueur en octobre 1991, établit un cadre juridique pour la promotion du recyclage, et désigne une catégorie de secteurs tenus d'accroître leur utilisation de matériaux recyclés, des catégories de produits devant contenir une part croissante de matériaux recyclables, des catégories de produits devant faire état de leur composition pour faciliter leur recyclage, et une catégorie de sous-produits devant être partiellement ou intégralement recyclés.

La loi sur le recyclage confère à plusieurs ministères et organismes les compétences pour établir des politiques sectorielles de base visant à promouvoir les ressources recyclables et les procédures pertinentes en la matière. Les secteurs ciblés sont la fabrication de papier, la fabrication de récipients en verre et la construction. Par ailleurs, certains types de produits doivent faire l'objet d'une procédure de recyclage définie à partir d'une analyse du cycle de vie : véhicules automobiles, pièces d'automobiles, gros appareils ménagers et 16 autres produits précis (appareils utilisant des piles, par exemple). Certains produits, notamment la plupart des récipients tels que les bouteilles et boîtes en PETP et les piles doivent être étiquetés de façon à faciliter leur recyclage. Le mâchefer produit par la sidérurgie est un exemple de sous-produit que la loi impose de recycler.

Une disposition adoptée en parallèle, la loi relative à des mesures temporaires visant à promouvoir des activités économiques en faveur de l'utilisation rationnelle de l'énergie et de la réutilisation des ressources recyclées, constitue essentiellement une mesure d'incitation économique accompagnant une action dynamique axée sur trois aspects de la réduction des déchets – promotion des économies d'énergie, promotion du recyclage, promotion de l'utilisation rationnelle de certains CFC – et s'inscrivant dans le cadre de la politique de promotion de l'utilisation appropriée et rationnelle des ressources énergétiques.

Initiatives volontaires

En avril 1995, l'industrie japonaise a lancé une action volontaire sous la forme d'un programme de gestion responsable visant la réalisation des objectifs de développement durable définis par le Programme Action 21. Son objectif est « l'amélioration et le développement permanents pour faire en sorte que les méthodes de gestion chimiques d'aujourd'hui soient meilleures que celles d'hier », par la mise en œuvre « d'un ensemble d'activités visant à protéger l'environnement et à garantir la sécurité à toutes les étapes des cycles de vie des substances chimiques ».

En décembre 1997, 90 entreprises, représentant plus de 70 pour cent de la valeur des produits commercialisés par l'industrie chimique japonaise, participaient à ce programme de gestion responsable qui fixe des objectifs précis. Concernant la sécurité écologique dans les phases de fabrication et de manutention, des objectifs sont fixés pour la réduction des émissions de SO_x et de NO_x , les économies d'énergie et de ressources, l'augmentation du taux de recyclage et la réduction des déchets. Ainsi, le taux de recyclage doit passer de 31 pour cent en 1995 à 46 pour cent en 2010. Autre exemple, le volume des déchets mis en décharge doit être réduit de 40 pour cent en 2010 par rapport au niveau de 1990.

Dans le cadre du programme, les entreprises participantes ont sélectionné 300 substances dont les émissions font désormais l'objet d'une enquête. Il s'agit de produits chimiques susceptibles d'avoir des effets nocifs sur la santé humaine, d'après plusieurs études conduites par des organismes publics locaux, l'Agence pour la protection de l'environnement et des fabricants de produits chimiques des États-Unis. Les résultats de cette enquête devraient permettre de préciser les points d'entrée de ces substances dans l'environnement, et ils pourraient en outre fournir des indicateurs pour mesurer l'efficacité des activités de réduction des émissions ainsi que les effets des produits chimiques sur la santé humaine et l'environnement. Par ailleurs, les entreprises participantes ont élaboré un programme sur trois ans visant à réduire les émissions atmosphériques de 12 substances chimiques nocives (notamment le dichlorométhane, le benzène, le chlorure de vinyle monomère, l'acrylonitrile et le dichloréthane). Son objectif est de réduire les émissions de chacune de ces substances de 20 à 30 pour cent en 1999 par rapport aux niveaux de 1995. En 1996, les entreprises participantes avaient déjà diminué de 34 pour cent les émissions des 12 produits chimiques.

ALLEMAGNE

En septembre 1994, la protection de l'environnement a été déclarée «objectif national» en Allemagne dans le cadre de la loi fondamentale modifiée. En effet, le nouvel article 20a de celle-ci impose à l'État, par l'intermédiaire du pouvoir législatif, de protéger les éléments naturels indispensables à la vie. Cette disposition définit le cadre de la politique de l'environnement de l'Allemagne et fonde son approche de la protection de l'environnement axée sur la protection de la vie, ce qui implique d'assurer la pureté de l'eau, de l'air et du sol.

De manière générale, le cadre de la politique de l'environnement de l'Allemagne se fonde sur la conviction que la protection de l'environnement est une condition impérative du maintien de la vie sur Terre, et que l'adoption de normes d'environnement strictes est également favorable à l'emploi et à l'économie. D'ailleurs, ces dispositions ont été à l'origine de la création d'un secteur industriel à part entière, essentiellement composé de petites et moyennes entreprises qui emploient 1.9 pour cent de la population active allemande. La politique de l'environnement de l'Allemagne couvre trois grands domaines d'activité :

- le développement continu de mesures préventives de protection de l'environnement ;
- l'assainissement de l'environnement ;
- la participation aux activités internationales de protection de l'environnement.

Dans le cadre de la politique de l'environnement de l'Allemagne, ces activités visent à protéger l'environnement par :

- l'atténuation des dommages déjà causés à l'environnement et l'adoption de mesures curatives ;
- la prévention des effets nocifs pour l'être humain et l'environnement ;
- la minimisation des risques pour l'être humain, les animaux, les végétaux et l'environnement naturel (sol, eau, air) ;
- la protection des zones de diversité biologique.

Ces différents objectifs, fondés sur le principe de précaution, le principe pollueur-payeur et le principe de coopération, ont été conçus en vue de leur intégration horizontale dans les diverses fonctions et activités de tous les ministères. Une série de lois-cadres ont ensuite été adoptées, assorties de nombreuses mesures complémentaires axées sur des problèmes d'environnement

déterminés. Par exemple, la Loi-cadre fédérale sur l'eau et divers textes spécifiques – notamment la loi relative aux redevances sur les eaux usées, la loi sur les agents de lavage et de nettoyage, l'Ordonnance sur les eaux de boisson, et la loi sur les rejets en mer – définissent les conditions de la protection de l'eau.

Globalement, l'objectif de la politique de l'environnement des autorités fédérales est de protéger l'environnement en associant les forces économiques et écologiques au sein d'une économie sociale de marché à orientation écologique. A cette fin, il convient de tenir compte des considérations d'environnement et d'intégrer des mesures de précaution dans toutes les décisions à caractère économique.

Pour atteindre cet objectif global, l'Allemagne s'appuie sur une stratégie d'amélioration permanente des dispositions administratives, de création d'incitations économiques pour encourager une utilisation plus durable des ressources et de renforcement de la recherche-développement sur des produits et méthodes de production plus innovants.

Les principaux moyens retenus pour la mise en œuvre des objectifs de la politique de l'environnement de l'Allemagne sont des instruments réglementaires (obligations et interdictions, études d'impact sur l'environnement), des instruments économiques visant à internaliser les coûts externes et des mesures d'accompagnement qui prennent en compte les engagements volontaires, le financement de technologies « propres » ou respectueuses de l'environnement et la recherche dans le domaine de l'environnement. Certaines dispositions complémentaires sous forme de sanctions et d'amendes administratives sont en outre prévues. Elles sont motivées par le sentiment que l'application de redevances de lutte contre les émissions et la prise en compte accrue des questions d'environnement dans la détermination de la fiscalité constituent de puissantes incitations économiques en faveur de la lutte antipollution (par exemple, les pollueurs acquittent une redevance sur les eaux usées dont le montant est fonction de la quantité et de la toxicité des rejets).

En tant qu'État membre de l'Union européenne, l'Allemagne doit intégrer dans sa législation les obligations définies par le Conseil de l'UE, et notamment trois directives adoptées en 1990 qui forment la base de la législation allemande en matière de biotechnologie et de génie génétique :

- Directive 90/219/CEE concernant l'utilisation confinée de micro-organismes génétiquement modifiés;
- Directive 90/220/CEE relative à la dissémination volontaire d'organismes génétiquement modifiés dans l'environnement;
- Directive 90/679/CEE concernant la protection des travailleurs contre les risques liés à l'exposition à des agents biologiques au travail.

Les Directives 90/219/CEE et 90/220/CEE ont été reprises dans la loi sur le génie génétique de 1990. La première version de ce texte a fait l'objet de nombreuses critiques de la part de l'industrie et des chercheurs universitaires en raison des lourdeurs bureaucratiques qui entravaient considérablement la recherche et l'investissement dans la biotechnologie. Modifiée en 1993, la loi vise de manière générale à protéger la santé humaine et l'environnement contre les risques potentiels associés aux produits du génie génétique. Elle prévoit notamment, aux fins de protection, la mise en place d'un système de classification des organismes recombinés, comprenant quatre niveaux de sécurité biologique, et impose divers critères et conditions qui vont de la construction d'équipements de confinement aux procédures de manutention et à la tenue de registres.

Air

En matière de qualité de l'air, le dispositif-cadre est la loi fédérale sur la lutte contre les émissions, qui réglemente les aspects suivants :

- Sites de production : il s'agit des centrales électriques, des sites industriels (y compris les incinérateurs), des ménages et des petits consommateurs. Les objectifs visés sont les suivants : lutte contre les émissions de polluants atmosphériques (particules, dioxyde de soufre, oxydes d'azote), amélioration du rendement des systèmes de chauffage et de l'isolation des constructions en vue d'une réduction de 30 pour cent de la consommation d'énergie pour le chauffage.

- Circulation : depuis 1985, les véhicules peu polluants bénéficient d'allègements fiscaux, et depuis 1993, tous les véhicules à moteur neufs doivent être équipés de catalyseurs à trois voies en circuit fermé. De plus, tous les véhicules doivent subir un contrôle de leurs gaz d'échappement. Concernant la consommation moyenne de carburant, l'objectif pour 2005 est d'atteindre un niveau de 5 litres aux 100 km. Grâce aux allègements fiscaux dont bénéficie l'essence sans plomb, 90 pour cent des véhicules utilisent aujourd'hui ce carburant. En outre, la réduction de la teneur en soufre du gazole a permis de diminuer de 60 pour cent les émissions de dioxyde de soufre des véhicules diesel (aux termes du Protocole d'Helsinki de 1985, l'Allemagne s'est engagée à réduire avant l'an 2000 ses émissions de dioxyde de soufre de 83 pour cent par rapport au niveau de 1980).

En matière de lutte contre l'ozone troposphérique, un certain nombre de mesures ont été adoptées :

- confinement des vapeurs d'hydrocarbures pendant le ravitaillement des véhicules (1996);
- renforcement de 50 pour cent des normes d'émission d'oxydes d'azote applicables aux véhicules (aux termes du Protocole de Sofia de 1988, l'Allemagne s'est engagée à réduire pour 1998 ses émissions annuelles d'oxydes d'azote de 30 pour cent par rapport aux niveaux de 1986);
- mesures d'interdiction de la circulation lorsque les niveaux d'ozone troposphérique dépassent un certain seuil;
- mise en place d'une taxe sur les véhicules à moteur en fonction des émissions qui vise une introduction rapide des camions peu polluants;
- réduction des émissions de solvants provenant des peintures et vernis et liées aux activités industrielles (aux termes du Protocole sur les COV de 1991, l'Allemagne s'est engagée à réduire ses émissions annuelles de composés organiques volatils de 30 pour cent pour 1999).

Concernant les gaz à effet de serre, la République fédérale d'Allemagne est partie à la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques. Le pays produit environ 4.5 pour cent (soit 900 millions de tonnes) des émissions mondiales de dioxyde de carbone. En l'occurrence, l'objectif est de réduire, pour 2005, les émissions nationales de dioxyde de carbone de 25 à 30 per cent par rapport aux niveaux de référence de 1990.

A cette fin, diverses mesures ont été adoptées pour :

- réduire les niveaux d'ensemble de consommation d'énergie;
- passer à des sources d'énergie plus favorables à l'environnement;
- accroître la part de l'énergie provenant de sources renouvelables.

Concernant la protection de la couche d'ozone stratosphérique, les autorités fédérales soutiennent les mesures convenues au plan international dans le cadre du Protocole de Montréal. En l'occurrence, les objectifs sont l'élimination progressive des CFC pour 1996, des halons pour 1994 et des hydrocarbures partiellement chlorofluorés au cours de la période 2003-2030.

Eau

L'axe principal des différentes initiatives adoptées par les autorités fédérales pour protéger les ressources en eau est la mise en œuvre de mesures de prévention pour limiter ou éviter les émissions à la source. Cette évolution marque une rupture avec les technologies « en bout de chaîne » au profit d'une production respectueuse de l'environnement et d'efforts visant à éviter les problèmes et appliquer des solutions au point d'origine de la pollution. Dans cette perspective, les mesures techniques au niveau des procédés, destinées à éviter la production d'eaux usées, prennent le pas sur le traitement en aval dans des stations d'épuration. Dans le cadre législatif fédéral actuel, les instruments visent, chaque fois que possible, la source de la pollution. La politique de l'Allemagne en matière de protection de l'eau couvre les eaux de surface, les eaux marines et côtières, et les eaux souterraines.

Dispositions juridiques pour la protection de l'eau

Le gouvernement fédéral est responsable de l'adoption de lois-cadres dans le domaine de la gestion de l'eau. Ensuite, les *Länder* (états fédérés) complètent ce dispositif avec leurs propres textes qui établissent en outre les règlements et procédures d'application. Ils ont également la charge de veiller au respect des dispositions réglementaires.

La loi fédérale sur l'eau, qui est la loi-cadre, définit les dispositions fondamentales en matière de gestion quantitative et qualitative de l'eau. Du point de vue administratif, les principaux instruments sont les autorisations obligatoires pour l'utilisation de l'eau. Par ailleurs, des conditions minimales sont imposées pour le rejet d'eaux usées dans les cours d'eau et, partant, pour le volume et l'épuration des eaux usées.

A la fin de 1995, un total de 37 ordonnances administratives nouvelles ou modifiées, fondées sur le cinquième amendement à la loi fédérale sur l'eau de 1986, étaient en vigueur. La loi relative aux redevances sur les eaux usées impose aux pollueurs d'acquitter une somme calculée sur la base du volume et de la toxicité des substances rejetées dans les eaux usées. Ces redevances sont versées aux *Länder* et affectées aux mesures de lutte contre la pollution de l'eau.

Le quatrième amendement à la loi (1994) a pour objectif d'encourager les pollueurs à investir dans la lutte antipollution. La loi sur les agents de lavage et de nettoyage définit le cadre juridique réglementant les substances incluses dans les agents de lavage.

L'emploi de substances présentant un risque pour l'eau peut ainsi être interdit ou limité. L'Ordonnance sur les eaux de boisson précise le niveau de qualité de l'eau potable, les obligations des compagnies de distribution d'eau et les conditions du contrôle exercé par les autorités sanitaires. De plus, elle fixe des valeurs limites pour les substances dangereuses pour la santé humaine, telles que les métaux lourds, les nitrates, les composés organiques et les agents pathogènes.

La qualité de l'eau est par ailleurs garantie par des textes complémentaires édictés dans le cadre de la loi sur l'eau, tels que la loi sur les substances chimiques, la loi fédérale sur la lutte contre les émissions, la loi sur la prévention et la gestion des déchets, la loi sur la protection des végétaux et la loi sur les rejets en mer.

Protection des mers

En 1988, le gouvernement fédéral a adopté un programme en dix points visant à améliorer le niveau de protection de l'environnement de la mer du Nord et de la mer Baltique. L'axe principal de ce programme consiste à accélérer la mise en œuvre des mesures nationales et des obligations internationales dont l'objectif premier est la réduction plus rapide des concentrations de nutriments et de substances dangereuses.

Coopération internationale pour la protection des eaux intérieures

En 1987, la Commission internationale pour la protection du Rhin contre la pollution a adopté un plan d'action en faveur du Rhin, aux termes duquel les parties doivent réduire leurs rejets de 50 pour cent pour 1995 par rapport aux niveaux de 1985. L'objectif global est de rétablir d'ici à l'an 2000 l'écosystème du Rhin dans un état permettant son repeuplement par les formes de vie supérieures auparavant présentes.

En 1991, le Conseil de l'UE a adopté une directive concernant la protection des eaux contre la pollution par les nitrates à partir de sources agricoles, dont l'objectif est de réduire massivement les apports de nitrates dans l'agriculture, de façon à protéger à long terme les ressources en eau potable et à combattre l'eutrophisation des masses d'eau.

En 1992, le gouvernement fédéral a signé un traité avec la Pologne pour la protection des cours d'eau transfrontières (bassin de l'Oder et de la Neisse), et en 1994, l'Allemagne et dix autres pays de la région du Danube ont signé avec l'UE une convention sur la protection du Danube.

Coopération internationale pour la protection de l'environnement marin

Concernant la protection de la mer du Nord et de l'Atlantique nord-est, le traité international le plus important est la Convention sur la protection de l'environnement marin de la zone nord-est de l'Atlantique, qui a été signé à Paris en 1992 par la République fédérale d'Allemagne et douze autres pays riverains. D'autres accords internationaux ont été conclus, notamment :

- la Convention de Londres sur la prévention de la pollution des mers résultant de l'immersion de déchets et autres matières (1972);
- le Programme d'action international de la Commission d'Helsinki sur la mer Baltique (1992);
- la Convention sur la protection de l'environnement marin dans la mer Baltique (1992);
- la Convention internationale pour la prévention de la pollution par les navires – MARPOL (1972).

Déchets

L'objectif des programmes de gestion des déchets adoptés en République fédérale d'Allemagne est de prévenir la production de déchets dans le secteur industriel et commercial. On estime que ce but impose le recours à des analyses du cycle de vie pour assurer une mise en œuvre cohérente de la nouvelle responsabilité des produits, élargie à l'ensemble de leur cycle de vie, c'est-à-dire de leur production à leur élimination. Les visées de la stratégie actuelle de gestion des déchets sont définies dans la loi-cadre sur la prévention et la gestion des déchets de 1986. Ce texte établit les principes suivants :

- la prévention de la production est la priorité absolue en matière de gestion des déchets;
- les déchets inévitables doivent être, chaque fois que possible, recyclés ou réutilisés;
- les déchets non recyclables doivent être éliminés selon des méthodes sans danger pour la santé humaine et l'environnement.

D'autres ordonnances, prises dans le cadre de la loi sur la prévention et la gestion des déchets, visent à réduire et prévenir la production de déchets. Il s'agit notamment des textes suivants :

- Ordonnance sur la prévention des déchets d'emballage (1991);
- Ordonnance sur les huiles usagées (1987);
- Ordonnance sur les solvants (1989);
- instructions techniques sur le stockage, le traitement et l'incinération des déchets spéciaux (1991);
- instructions techniques concernant les déchets des établissements humains (1993).

Les dernières améliorations apportées à la loi sur la prévention et la gestion des déchets l'orientent désormais vers la promotion de principes relatifs à la gestion des déchets et à des cycles de substances fermés respectueux de l'environnement. En 1994, ces principes ont été inscrits dans la loi sur la gestion des déchets en circuit fermé. Parmi les autres instruments réglementaires adoptés par les autorités fédérales dans le domaine de la gestion des déchets, les plus importants sont les suivants :

- Ordonnance sur la prévention des déchets d'emballage (1991);
- Convention de Bâle (1994) réglementant les transports transfrontières de déchets dangereux;
- Règlement du Conseil de l'UE concernant les transports de déchets (1993);
- Loi sur les transports de déchets (1992).

Initiatives volontaires

En règle générale, les initiatives volontaires de l'industrie allemande répondent à des obligations imposées par la loi. En effet, les autorités fédérales fixent régulièrement des objectifs auxquels l'industrie doit se conformer. Toutefois, conformément à la conviction des autorités que la protection de l'environnement se traduit par des avantages économiques, la législation n'impose aucune méthode

pour la réalisation de ces objectifs. Par conséquent, l'industrie est libre de mettre en œuvre des initiatives volontaires qui sont efficaces par rapport à leur coût ou qui sont susceptibles de produire des avantages économiques, à condition que les objectifs de la loi soient atteints.

Par exemple, l'Ordonnance de 1991 sur la prévention des déchets d'emballage, prise dans le cadre de la loi sur la prévention et la gestion des déchets, impose aux fabricants et détaillants d'accepter les déchets d'emballage retournés et de les recycler en dehors du système public de ramassage des déchets. Devant ce qu'elle considère comme une obligation onéreuse et difficilement réalisable, l'industrie a créé et financé à titre volontaire l'entreprise Dual System Deutschland GmbH (DSD) qui se charge de la collecte, du tri et du recyclage des emballages des produits vendus au détail. En réponse à cette initiative, les autorités ont accepté d'exempter les fabricants et détaillants participant à l'initiative DSD de l'obligation d'accepter les déchets d'emballage retournés. Les pouvoirs publics assurent un contrôle permanent du système et fixent des contingents de collecte et de tri toujours plus stricts auxquels DSD est tenu de se conformer.

Des initiatives du même type ont été adoptées pour les emballages industriels. Par exemple, la société Bayer AG utilisait auparavant 136 types différents de palettes de transport en bois, ce qui du point de vue logistique posait un énorme problème au recyclage. Bayer a donc volontairement ramené le nombre de ses palettes à cinq et, pour dédommager les fournisseurs de palettes des coûts de récupération et de recyclage, l'entreprise a également accepté d'acheter au même prix les palettes neuves et les palettes recyclées. Cette initiative n'a pas augmenté les coûts pour Bayer, et les économies de matières premières ont compensé les coûts de recyclage pour les fournisseurs.

Comme nous l'avons déjà souligné, l'industrie allemande participe également à l'initiative volontaire prise dans le cadre du programme de gestion responsable.

REFERENCES

PROGRAMME ACTION 21

Déclaration de Rio.

Convention sur la diversité biologique.

Protocole de Montréal.

Convention de Bâle.

Convention sur les changements climatiques (réchauffement planétaire).

CANADA

Leaders environnementaux 2 : Accélération de la réduction/élimination des toxiques (ARET), ministre des Travaux publics et des Services gouvernementaux, Canada, 1997.

Leaders environnementaux 2 : ARET, moteurs de l'action volontaire dans le domaine des substances toxiques, Secrétariat de l'ARET, Environnement Canada, 351, bd. St Joseph, Hull, Québec, Canada, K1A 0H3, mars 1995.

Mise à jour ARET : Supplément à Leaders environnementaux 1, décembre 1995.

Secrétariat de l'ARET, Environnement Canada, 351, bd St Joseph, Hull, Québec, Canada K1A 0H3.

Loi canadienne sur la protection de l'environnement.

Règlement sur les substances appauvrissant la couche d'ozone.

Loi canadienne sur la protection de l'environnement (LCPE).

Règlement sur la notification (et l'évaluation) des nouvelles substances.

Évaluation prioritaire des substances (substances existantes).

Conference Board du Canada, Executive Summary on Voluntary Environmental Initiatives in Canada 1996 (status report).

Politiques

Plan d'action sur la gestion des substances chlorées : Progress Report, octobre 1996, ministre des Travaux publics, gouvernement du Canada, 1996.

Centre-Renseignements, Environnement Canada, 351, bd St Joseph, Hull, Québec, Canada K1A 0H3.

Life Cycle Management Approaches in Canadian Industry, Environnement Canada, Service de la protection de l'environnement, Centre-Renseignements Environnement, Canada, 351, bd St Joseph, Hull, Québec, Canada K1A 0H3.

Un engagement national pour la prévention de la pollution.

JAPON

Lois sur la prévention de la pollution de l'environnement – Japan EHS Law → in Series, vol. III.

Loi pour la promotion de l'utilisation des ressources recyclables.

Loi relative à des mesures temporaires visant la promotion d'activités en faveur de l'utilisation rationnelle de l'énergie et de la réutilisation des ressources recyclées.

Programme d'action pour arrêter le réchauffement planétaire, 23 octobre 1990.

Loi relative à l'utilisation rationnelle de l'énergie.

Loi sur le contrôle et la réglementation de la fabrication, etc., des substances chimiques.

Loi sur le contrôle de la pollution de l'eau.

Loi sur la lutte contre les substances toxiques et nocives.

Loi sur l'évacuation des déchets et l'assainissement public.

Gestion responsable : rapport annuel 1995, Conseil japonais pour la gestion responsable.

Plan national d'action pour la mise en œuvre du programme Action 21 : gouvernement du Japon.

ALLEMAGNE

Loi fondamentale de l'Allemagne : Nouvelle loi fondamentale, article 20a, septembre 1994.

Loi fédérale sur l'eau (*Wasserhaushaltsgesetz*) 1986.

Loi relative aux redevances sur les eaux usées (*Abwasserabgabengesetz*) 1991.

Loi sur les agents de lavage et de nettoyage (*Wasch – und Reinigungsmittelgesetz*).

Ordonnance sur les eaux de boisson (*Trinkwasserverordnung*).

Loi sur les rejets en mer (*Hohe-see-Einbringungsgesetz*).

Directive 90/219/CEE concernant l'utilisation confinée de micro-organismes génétiquement modifiés, 23 avril 1990.

Directive 90/220/CEE relative à la dissémination volontaire d'organismes génétiquement modifiés dans l'environnement, 23 avril 1990.

Directive 90/679/CEE concernant la protection des travailleurs contre les risques liés à l'exposition à des agents biologiques au travail, 26 novembre 1990.

Loi fédérale sur la lutte contre les émissions (*Bundes-Immissionsschutzgesetz, BimSchG*).

Protocole d'Helsinki, 1985.

Protocole de Sofia, 1988.

Protocole sur les composés organiques volatils, 1991.

Loi sur la prévention et la gestion des déchets (*Abfallgesetz*), 1^{er} novembre 1986.

GLOSSAIRE*

| | |
|--|---|
| Abzyme | Anticorps présentant une activité catalytique. |
| Acide désoxyribonucléique (ADN) | Molécule qui code généralement toute l'information génétique. Elle est formée de deux brins ou chaînes de sous-unités (appelées nucléotides). |
| ADNr | Voir ADN recombiné. |
| ADN recombiné (ADNr) | Molécule d'ADN formée par la combinaison de segments d'ADN provenant d'au moins deux sources. |
| Agent flocculant | Substance chimique qui effectue la précipitation ou la floculation rapide d'un soluté dans une solution. |
| Agent pathogène | Agent qui cause une maladie ; expression généralement réservée à des organismes vivants tels qu'une bactérie ou un virus. |
| Allostérie | Propriété qui intervient dans la régulation de l'activité enzymatique et par laquelle une substance se lie à l'enzyme en une position autre que le site actif et modifie ainsi la forme de l'enzyme. |
| Analyse du cycle de vie | Compilation et évaluation des entrées et sorties et des impacts potentiels sur l'environnement d'un système de produit sur l'ensemble de son cycle de vie (voir cette expression). |
| Anticorps | Protéine produite par le système immunitaire de l'organisme en réponse à certaines substances étrangères appelées antigènes. |
| Apoptose | Mort programmée d'une cellule, déclenchée par le noyau dans des cellules fonctionnant normalement, lorsque l'âge ou l'état de la cellule l'exige. |
| ARN | Molécule de structure analogue à l'ADN (voir ce terme) qui intervient dans un certain nombre d'activités cellulaires, en particulier dans la synthèse des protéines. Le matériel génétique de certains virus est formé d'ARN. |
| Attribution | Attribution des flux entrants ou sortants d'un procédé au système de produit étudié. |
| Bactériocine | Substance que certaines bactéries peuvent libérer et qui tue des bactéries d'autres souches qui leur sont étroitement apparentées. |
| Biocatalyseur | Enzyme utilisée pour catalyser une réaction chimique. |
| Biodiversité | Diversité globale des formes de vie, complexes écologiques dans lesquels elles se manifestent et processus écologiques auxquels elles prennent part ; diversité biologique au niveau des gènes, des espèces et des écosystèmes. |
| Biofilm | Communauté microbienne adhérant à une surface, généralement dans une matrice de substances polymériques extracellulaires. |

* Note : Les noms de produits chimiques particuliers, la polycaprolactone par exemple, n'ont pas été inclus.

| | |
|---|--|
| Biogazole | Huiles végétales et dérivés chimiques utilisés comme carburants de remplacement dans les moteurs diesel. |
| Bioinformatique | Utilisation d'ordinateurs pour résoudre des problèmes d'information dans les sciences de la vie; avant tout, création de vastes bases de données sur les génomes, les séquences de protéines, etc. |
| Biomasse | Ensemble des matières organiques résultant de la conversion de l'énergie solaire par photosynthèse; masse totale des organismes vivants d'un écosystème. |
| Biomimétique | Branche de la biologie qui utilise des systèmes biologiques comme modèles pour mettre au point des systèmes synthétiques. |
| Boues activées (procédé aux) | Procédé aérobie de traitement secondaire des eaux usées utilisant des populations actives complexes de micro-organismes aérobies pour décomposer des matières organiques. |
| Catalyseur de transfert de phase | Substance qui accélère la réaction entre des réactifs se trouvant dans des phases (états physiques) différentes. |
| Chimie combinatoire | Technique qui introduit un élément aléatoire dans la synthèse automatisée de composés nouveaux et produit ainsi plusieurs milliers de composés différents simultanément. |
| Chiralité | Propriété stérique de certaines molécules qui leur donne une configuration droite ou gauche. |
| Chitosane | Polymère constitué d'unités glucosamine que l'on trouve dans les parois cellulaires de certains champignons. |
| Composé chiral | Molécule qui a un centre asymétrique et peut exister sous deux formes non superposables, dites droite et gauche, qui sont l'image dans un miroir l'une de l'autre (et sont appelées isomères optiques). |
| Culture mixte | Association interactive entre des micro-organismes qui se traduit généralement par une combinaison d'activités métaboliques. |
| Cycle de vie | États consécutifs et liés d'un système de produit depuis l'acquisition de matières premières ou la production de ressources naturelles jusqu'à l'élimination finale. |
| Dendrone, dendrimère | Polymères globulaires très réguliers de dimension nanométrique présentant une structure moléculaire arborescente, qui peuvent jouer le rôle de catalyseurs de transfert de phase (voir cette expression) ou servir à immobiliser des substances réactives. |
| Détection par quorum | Voir encadré 3.5. |
| Développement durable | Stratégies et actions ayant pour objectif de répondre aux besoins et aspirations du présent sans compromettre la capacité de répondre à ceux de l'avenir. |
| Écologie | Étude des relations entre les organismes vivants et leur environnement. |
| Écosystème | Système fonctionnel autonome qui comprend les organismes d'une communauté naturelle et leur environnement. |
| Environnements extrêmes | Environnements caractérisés par des conditions extrêmes de croissance, en matière de température, de salinité, de pH et de disponibilité d'eau, par exemple. |
| Enzyme | Protéine qui catalyse la conversion d'un substrat en un produit. En dehors d'un petit nombre d'enzymes bien connues comme la papéine et la trypsine, la plupart des noms d'enzymes se reconnaissent au suffixe -ase : cellulase, protéase, etc. |

| | |
|--|---|
| Évaluation des risques | Détermination des effets nocifs potentiels sur la salubrité de l'environnement consécutifs à l'exposition à des polluants et à d'autres matières toxiques ou à des procédés industriels. |
| Extraction de connaissances à partir de données | Interrogation de bases de données en vue de formuler et de tester des hypothèses. |
| Extrémophile | Micro-organisme dont la croissance est optimale dans des conditions extrêmes de température, etc. |
| Fluide supercritique | Matière non aqueuse maintenue au-dessus de sa température critique de sorte qu'elle ne peut pas se liquéfier. |
| Flux d'énergie | Flux entrant ou sortant d'un processus unitaire ou d'un système de produit, mesuré en unités d'énergie. |
| Gène | Unité de base de l'hérédité, séquence ordonnée de bases nucléotidiques formant un segment d'ADN. Un gène contient la séquence d'ADN qui code pour une chaîne polypeptidique. La somme des gènes d'un organisme constitue son génome. |
| Génie génétique | Modification délibérée des propriétés génétiques d'un organisme par application de la technologie de l'ADN recombiné (voir cette expression). |
| Génomique | Étude des génomes, y compris leur cartographie, le séquençage des gènes et la fonction des gènes. |
| Immuno-essai | Technique d'analyse permettant de mesurer la concentration des anticorps (voir ce terme) ou des antigènes dans une solution. |
| Lactone | Ester cyclique résultant de la perte d'une molécule d'eau par un acide alcool. |
| Lignine | Substances organiques polyphénoliques qui servent de liants aux fibres de cellulose dans le bois et dans certaines plantes. |
| Limite du système | Interface entre un système de produit et l'environnement ou d'autres systèmes de produit. |
| Liquide ionique | Solide ionique qui a été chauffé au-dessus de son point de fusion (voir annexe 1.2). |
| Macrophage | L'un des divers types de cellules présentes dans le sang, le foie, etc., qui ingèrent et décomposent les matières sous forme de particules. |
| Matière première | Matière primaire ou secondaire utilisée comme intrant dans un procédé. |
| Modification post-traductionnelle | Modification des protéines après la traduction de l'ARN messager en une chaîne d'acides aminés, à savoir par glycosylation ou phosphorylation. |
| Mondialisation | Expansion géographique des ventes et des approvisionnements, homogénéisation des modes de consommation et de production, et rôle dominant des pays industrialisés dans la détermination de l'orientation principale de l'évolution technologique. |
| Mycorhize | Association stable entre un champignon et la racine d'une plante; la structure racine-champignon elle-même. |
| Oligonucléotide | Polymère nucléotidique court (fragment d'ADN ou d'ARN, par exemple). |
| Oligosaccharide | Molécule formée d'un petit nombre de sucres simples unis par des liaisons glycosidiques. |

| | |
|--|--|
| Organismes planctoniques | Organismes librement suspendus dans un liquide, par opposition à ceux vivant dans un biofilm (voir ce terme). |
| Organismes (ou micro-organismes) recombinés | Organismes dont le phénotype (voir ce terme) est le résultat d'une recombinaison. |
| Phénotype (phénotypique) | Caractéristiques d'un organisme qui résultent de l'interaction entre sa constitution génétique et l'environnement. |
| Phéromone | Substance de type hormonal sécrétée dans l'environnement par certains animaux, surtout les insectes. |
| Pollution dispersive | Dispersion diffuse d'un polluant, par exemple dans un produit ou dans l'environnement. |
| Polykétides | Vaste famille de produits naturels de structures diverses synthétisés par des cycles répétés de condensation de thioesters; ils comprennent des antibiotiques, des produits antiparasitaires et des médicaments anticancéreux. |
| Produit d'alimentation | Matière première (voir cette expression) d'un processus pétrochimique. |
| Protéomique | Étude de l'expression des gènes dans le but de définir le complément entier de protéines exprimé par un génome, cellule ou type de tissu particulier. |
| Ribozyne | Molécule d'ARN (voir ce terme) qui est capable de catalyser une réaction chimique. |
| Sonochimie | Procédés chimiques utilisant les effets des ultrasons (voir annexe 1.2). |
| Stéréosélectif | Se dit d'un biocatalyseur qui peut faire la distinction entre des substances ayant la même composition chimique mais des configurations structurales différentes. |
| Stéréosélectivité | Capacité de sélection entre deux isomères optiques (voir Composé chiral). |
| Stoechiométrie (stoechiométrique) | Description d'une réaction en termes de proportions nettes de réactifs qui sont consommés et de produits qui sont formés. |
| Technologie de l'ADN recombiné | Capacité d'exciser des segments précis d'ADN d'une espèce d'organisme et de les insérer dans l'ADN d'une autre espèce. |
| Transparence | Présentation libre, complète et compréhensible de l'information. |

Le *Life Science Dictionary* – que l'on trouve sur Internet à l'adresse : <http://biotech.chem.indiana.edu/pages/dictionary.html> – est une source utile de définitions dans le domaine des sciences de la vie.

Les abréviations suivantes ont été utilisées dans le rapport :

| | |
|------|--------------------------------|
| l | litre |
| kg | kilogramme |
| t | tonne |
| bbbl | baril (de pétrole brut) |
| MPa | mégapascal (unité de pression) |
| J | joule (unité d'énergie) |
| ppm | parties par million |

LISTE DES PARTICIPANTS

SOUS-GROUPE AD HOC SUR LA BIOTECHNOLOGIE POUR LES PRODUITS ET PROCÉDÉS INDUSTRIELS PROPRES

(La liste qui suit inclut des participants à la première réunion du sous-groupe *ad hoc*, qui s'est déroulée les 11 et 12 avril 1996, ainsi que d'autres membres délégués par leurs autorités, dont certains ont également assisté à des réunions de l'équipe de rédaction. Une liste définitive sera communiquée après la deuxième réunion du sous-groupe *ad hoc*).

| | | |
|--------------------------------------|--|-------------|
| M. A. BULL, Président | University of Kent | Royaume-Uni |
| M. B. MARRS, Vice-président | Photosynthetic Harvest, Inc. | États-Unis |
| M. R. KURANE, Vice-président | Ministère du Commerce extérieur et de l'Industrie | Japon |
| M. W. CRUEGER | Service de la protection de l'environnement, Bayer AG | Allemagne |
| Mme C. JUNGE | Forschungszentrum Jülich GmbH | Allemagne |
| M. D. SELL | Apparatewesen, Chemische Technik und Biotechnologie, e.V., DECHEMA | Allemagne |
| Mme. M. OBERLEHNER | Ministère fédéral de l'Environnement | Autriche |
| M. J. DE BRABANDERE | Services fédéraux des affaires scientifiques, techniques et culturelles | Belgique |
| M. V. AIDUN (remplaçant D. Mahon) | Industrie Canada | Canada |
| M. I.V. ECONOMIDIS | Commission des communautés européennes, Direction générale Science, Recherche et Développement (DGXII) | CE |
| M. Y. CHUNG | Institut coréen des sciences et de la technologie | Corée |
| M. C. SOLÀ | Universidad Autónoma De Barcelona | Espagne |
| M. R. ATLAS | University of Louisville | États-Unis |
| M. V. LUNGAGNANI | ASSOBIOTEC | Italie |
| M. S. SUMIDA | Technologie, Sécurité et Environnement Association japonaise des bioindustries | Japon |
| M. E. ACEVES PINA | CONACYT (Conseil national des sciences et de la technologie) | Mexique |
| M. G. GONZALES-DAVILA | Conseiller en affaires environnementales et représentant permanent (ministère de l'Environnement) du Mexique auprès de l'OCDE | Mexique |

| | | |
|-----------------------------|--|-------------|
| M. H.J. DODDEMA | TNO-Environmental Sciences, Energy, Process Innovation | Pays-Bas |
| M. P. VER LOREN VAN THEMAAT | Direction générale de l'industrie et des services | Pays-Bas |
| M. M. GRIFFITHS | Mike Griffiths Associates | Royaume-Uni |
| M. H.P. MEYER | LONZA AG | Suisse |

Consultants

| | | |
|-------------|--|-------------|
| M. B. DIXON | | Royaume-Uni |
|-------------|--|-------------|

Secrétariat

| | | |
|----------------|--|------|
| M. S. WALD | Direction de la science, de la technologie et de l'industrie | OCDE |
| M. T. HIRAKAWA | Direction de la science, de la technologie et de l'industrie | OCDE |

LES ÉDITIONS DE L'OCDE, 2, rue André-Pascal, 75775 PARIS CEDEX 16
IMPRIMÉ EN FRANCE
(93 98 03 2 P) ISBN 92-64-26102-8 – n° 50172 1998