

CAPAS

Biotechnologie Industrielle et Chimie Durable (CAPAS : GT N° 32)

Composition du groupe de travail :

Président : Charles G. Bienfait – SOLVAY SA

Secrétaire : Wim Soetaert – Universiteit Gent (RUG)

Membres : Spiros Agathos - UCL

Jean-Guy Baudoin - FSAGX/ VALBIOM (Gembloux)

Catherine Boegen - Kitozyme

Christian-Marie Bols – Wetlands Engineering

Philippe Bourdeau – CAPAS-ULB

Dirk Carrez – Belgobiotech (Fedichem)

Patrick Gerin - UCL

Raymond Hanus - ULB

Jacques Quivy – DGTRE (Wallonie)

Michel Paquot – FSAGX (Gembloux)

Jean-Jacques Van de Berg - CAPAS

Sophie Van Hulle - UCL

CAPAS : Comité de l'Académie pour les Applications de la Science

Biotechnologie industrielle et chimie durable

Table des matières

Résumé

1. Introduction

2. Chimie durable

3. Biotechnologie

3.1. La biotechnologie : une notion évolutive

3.2. Qu'est-ce que la biotechnologie industrielle ?

4. La biotechnologie industrielle et la chimie

4.1. Les matières premières renouvelables ou fossiles

4.2. Les matières premières renouvelables pour l'industrie

4.3. Les procédés « Bio » de la biotechnologie industrielle

4.3.1. Les procédés de fermentation

4.3.2. Les procédés enzymatiques

4.4. Les produits basés sur la biotechnologie industrielle

4.5. Les avantages économiques et écologiques de la biotechnologie industrielle

4.6. La bio-énergie

4.6.1. Les perspectives de la bio-énergie

4.6.2. La consommation mondiale d'énergie et le potentiel offert par la biomasse pour la fourniture d'énergie

4.6.3. Les directives européennes, politique agricole et détaxation des bio-fuels

5. Évolution sociétale et technologique dans les années à venir

- 5.1. Évolution des flux de matières premières primaires
- 5.2. Croissance démographique et augmentation de la demande en matières premières et en énergie
- 5.3. La demande accrue d'efficacité dans les systèmes chimiques de production
- 5.4. Le besoin impérieux d'une durabilité des systèmes de production
- 5.5. Évolution de la perception et des comportements des utilisateurs
- 5.6. Évolution de la politique agricole européenne

6. Recommandations politiques

6.1. Recommandations aux pouvoirs publics belges

- 6.1.1. Les pouvoirs publics doivent mieux suivre le développement de la biotechnologie industrielle
- 6.1.2. Les pouvoirs publics doivent accorder plus d'attention et de soutien à la recherche appliquée pluridisciplinaire qui élargit le champ des connaissances
- 6.1.3. Prise de conscience de l'importance de la masse critique en Recherche et Développement
- 6.1.4. Mettre en lumière l'importance de la biotechnologie industrielle et en promouvoir la connaissance
- 6.1.5. Élaboration de mesures politiques et fiscales de soutien
 - 6.1.5.1. Défisicalisation de la bio-énergie à l'échelle européenne
 - 6.1.5.2. Mesures destinées à promouvoir le développement des (bio)produits et bioprocessus durables

6.2. Recommandations aux autorités européennes

- 6.2.1. Élaboration d'une politique européenne en matière de biotechnologie industrielle
- 6.2.2. Accorder plus d'attention à la biotechnologie industrielle dans le cadre de la politique européenne en matière de Recherche et Développement

6.3. Recommandations à l'industrie belge

- 6.3.1. Mise en place d'une coopération entre l'industrie chimique et l'agro-industrie
- 6.3.2. Investir davantage dans la Recherche et le Développement
- 6.3.3. Mettre en lumière l'importance de la biotechnologie industrielle et en promouvoir la connaissance

6.4. Création d'une plate-forme technologique pour la biotechnologie industrielle

7. Conclusions et perspectives

8. Bibliographie

ANNEXE A – Exemples de produits basés sur la biotechnologie industrielle

- A.1. Les additifs et suppléments nutritionnels
- A.2. Les bio-pesticides
- A.3. Les bio-colorants et arômes
- A.4. Les solvants
- A.5. Les plastiques et les bio-plastiques
- A.6. Les vitamines
- A.7. Les produits de chimie fine et pharmaceutiques

ANNEXE B – Bio-fuels : technologie, applications et marché

- B.1. Le bio-éthanol
- B.2. Le bio-diesel
- B.3. Le biogaz

Résumé

La biotechnologie industrielle, également connue sous le nom de biotechnologie blanche, se démarque de la biotechnologie rouge (axée sur les soins de santé) et de la biotechnologie verte (organismes génétiquement modifiés). Elle constitue le troisième pilier de la biotechnologie et est actuellement en forte progression. La biotechnologie industrielle utilise les systèmes biologiques pour produire des substances chimiques utiles. Il s'agit d'une technologie essentiellement fondée sur la catalyse biologique (l'utilisation d'enzymes pour catalyser des réactions chimiques) et la technologie de la fermentation (utilisation orientée de micro-organismes), alliées aux récentes avancées dans le domaine expérimental de la génétique moléculaire et le génie métabolique.

Cette nouvelle technologie contribue considérablement à la chimie durable ou chimie verte, qui vise à convertir des matières premières renouvelables - notamment des sucres ou des huiles végétales - en une gamme de substances chimiques : produits de chimie fine, produits pharmaceutiques, bio-colorants, additifs olfactifs, solvants, plastiques biologiques, vitamines, additifs alimentaires, bio-pesticides et biocarburants tels le bioéthanol (pétrole vert), le bio-diesel et le biogaz.

Les applications de la biotechnologie industrielle présentent d'importants avantages écologiques. L'utilisation préférentielle de matières premières renouvelables de provenance agricole remplace l'utilisation de combustibles d'origine fossile tels le pétrole brut ou le gaz. Par conséquent, cette technologie a un impact bénéfique sur l'effet de serre en réduisant l'émission de gaz et stimule en même temps le secteur agricole qui produit ces matières premières. En outre, la biotechnologie industrielle offre des avantages techniques considérables par rapport à la technologie de la chimie conventionnelle : une cinétique de réaction plus rapide, un meilleur rendement de conversion, une plus grande pureté du produit final, une réduction de la consommation d'énergie et une nette diminution de la production de déchets et résidus chimiques. L'ensemble de ces facteurs explique la forte pénétration de la biotechnologie industrielle dans tous les secteurs de l'industrie chimique, particulièrement dans le domaine des produits de chimie fine, mais également des produits chimiques en vrac tels les plastiques et les carburants. Le taux de pénétration actuel des procédés de production biotechnologiques dans l'industrie chimique est estimé à 5 % et, selon une étude de McKinsey (2002), on peut s'attendre à ce qu'il atteigne 10 - 20 % d'ici 2010.

Pour l'heure, cette évolution fulgurante est essentiellement déterminée par les lois du marché et axée sur le rendement supérieur des procédés de production biotechnologiques. À l'avenir, cependant, une série de changements sociétaux et technologiques devraient concourir à renforcer cette tendance, notamment l'épuisement des réserves de pétrole brut, l'augmentation de la demande en matières premières et en énergie liée à la croissance démographique, la demande de systèmes de production chimique efficaces et durables, et l'évolution de la politique agricole européenne.

Le développement de la biotechnologie industrielle présente un intérêt immédiat pour l'agro-industrie et l'industrie chimique belges, dont le poids économique est considérable. Comme cela s'est déjà vu dans d'autres pays, une collaboration entre ces deux secteurs de l'industrie peut générer des activités totalement innovantes. En outre, la biotechnologie industrielle apporte un soutien crucial au secteur agricole européen, contribuant de manière significative à mettre en place un modèle de société durable.

Étant donné l'importance stratégique de la biotechnologie industrielle pour l'avenir de la Belgique et l'absence d'une politique cohérente en la matière, le groupe de travail CAPAS a formulé un certain nombre de recommandations à l'intention des pouvoirs publics, du monde politique et de l'industrie. En particulier, le gouvernement belge, la Commission Européenne et le monde de l'industrie devraient consentir davantage d'efforts visant à stimuler le développement de la biotechnologie industrielle en accordant leur soutien à la recherche appliquée dans ce domaine, une recherche pluridisciplinaire et axée sur l'élargissement du champ des connaissances. Il s'agit notamment de mettre en place des programmes de recherche spécifiques, à la fois au niveau national et au niveau européen. Le groupe de travail CAPAS recommande un ensemble de mesures politiques et fiscales, parmi lesquelles la défiscalisation des biocarburants - conformément aux directives européennes - doit être une priorité. Le manque d'initiative du gouvernement belge en la matière est flagrant si l'on compare la situation en Belgique à la politique des pays avoisinants.

Il y a également lieu d'entreprendre les actions nécessaires pour que le public prenne conscience de l'utilité de la biotechnologie industrielle. Le lien manifeste entre la biotechnologie industrielle et le développement durable dans la société devrait améliorer l'image actuelle de la biotechnologie en général, trop négative.

1. Introduction

Le développement durable est « un développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures à répondre aux leurs. » (G.H. Brundtland, 1987). Personne ne conteste cette définition par Brundtland de la notion de développement durable, et on observe incontestablement une tendance générale de la société dans ce sens. Parce qu'il est de plus en plus important de produire et d'entreprendre de façon durable, dans le respect de la nature et des générations futures, ce principe général est appliqué avec de plus en plus de détermination dans les divers secteurs de production agricole et industrielle, ainsi que dans les services.

C'est dans ce contexte de développement durable que l'importance de la biotechnologie et l'utilisation de matières premières renouvelables - tant pour la production chimique que pour la production d'énergie - ont récemment fait l'objet d'une attention soutenue. Le recours à la biotechnologie et aux ressources renouvelables en tant qu'alternatives à la chimie traditionnelle fondée sur les matières premières fossiles n'est qu'un aspect du vaste concept de « chimie durable », selon lequel il convient d'établir un rapport harmonieux entre l'écosphère (la nature en tant que fournisseur de matières premières et d'énergie), la technosphère (production et transformation) et la sociosphère (utilisation et comportement des consommateurs).

Les secteurs traditionnels de la production chimique doivent se rendre à l'évidence et accorder à cette « chimie verte » toute l'attention qu'elle mérite. L'effet de serre, l'appauvrissement des réserves de combustibles fossiles, la mise en œuvre de technologies propres et la biodégradabilité souhaitée pour les produits industriels en général incite de plus en plus de secteurs à recourir aux matières premières renouvelables pour des applications non alimentaires.

La durabilité est également devenue un critère important dans le domaine de l'approvisionnement en énergie. L'Union Européenne a fixé l'objectif de puiser 14 % de notre approvisionnement en énergie à des sources renouvelables d'ici 2010. Jusqu'à présent, ce type de sources d'énergie ne répond qu'à 5,8% des besoins en énergie de l'UE. Cette donnée illustre bien la mesure dans laquelle ce secteur est amené à connaître une forte évolution dans les prochaines années.

Tant dans le domaine de la chimie durable, ou chimie verte, que dans celui de la production de bioénergie, la biotechnologie est appelée à jouer un rôle de plus en plus prépondérant. C'est pourquoi on fait actuellement référence à la notion de « biotechnologie industrielle ». Celle-ci recouvre notamment l'utilisation de micro-organismes (levures, moisissures et bactéries) ou d'enzymes pour fabriquer des produits ou substances chimiques utiles.

Les scientifiques et les techniciens spécialistes en chimie se doivent de jouer un rôle critique et de contribuer à une évolution correcte dans ce domaine tant du point de vue scientifique, que technologique et social. Ce groupe de travail s'est donné pour tâche de dresser un état des lieux du vaste éventail d'applications industrielles, de rendre compte de leur évolution et de mettre en lumière l'impact de la biotechnologie industrielle. Son autre objectif a été de recueillir le point de vue d'experts dans les différents sous-domaines et de formuler des recommandations à l'intention des pouvoirs publics afin d'orienter (ou de réorienter) et de stimuler le développement de la biotechnologie industrielle.

Développement durable

La notion de développement durable s'attache en premier lieu à garantir la viabilité à long terme de notre monde et à créer un équilibre harmonieux entre la croissance économique, la préservation des écosystèmes et l'amélioration de la qualité de la vie. Dans cette optique, la distribution des richesses naturelles doit se faire dans un esprit d'équité sociale.

Le développement durable doit répondre aux besoins du présent, sans compromettre la capacité des générations futures à répondre aux leurs.

2. Chimie durable

L'industrie chimique recouvre la production d'un vaste éventail de composés, qui peuvent être classés sommairement en quelques grandes catégories : les produits de chimie fine, les produits pharmaceutiques, les produits chimiques en vrac, les matières synthétiques (plastiques) et les combustibles. Si l'industrie chimique est un secteur de production de premier plan, elle est également grande consommatrice de matières premières (fossiles) et d'énergie, et elle génère une quantité considérable de déchets.

Pour les chercheurs, les chimistes et les techniciens spécialistes en chimie, le défi consiste à développer des services, produits et procédés chimiques durables qui respectent l'environnement, améliorent notre qualité de vie et, en même temps, demeurent concurrentiels. Il s'agit notamment de mettre au point de nouveaux procédés de fabrication qui réduisent ou éliminent l'utilisation et la formation de substances dangereuses ou toxiques, qui minimisent la consommation d'énergie et la production de déchets et qui, dans la mesure du possible, se fondent sur des matières premières renouvelables. La finalité recherchée est de développer une technologie chimique propre à partir de matières premières et de combustibles renouvelables et qui, tout en réduisant la production de déchets au minimum, atteint un niveau maximum de productivité et de compétitivité.

Cette chimie durable s'appuie sur une gamme étendue de technologies diverses, notamment l'optimisation de processus chimiques traditionnels, le recours à de meilleurs catalyseurs, les innovations techniques dans le domaine de la décomposition (comme les procédés à membrane et les techniques de recyclage) ainsi que l'application de la biotechnologie industrielle. Cette dernière a un impact de plus en plus manifeste sur le secteur de l'industrie chimique parce que la biotechnologie est, de par sa nature, parfaitement adaptée à la chimie durable. Si les procédés chimiques traditionnels sont souvent difficilement compatibles avec l'utilisation de matières premières renouvelables, la biotechnologie industrielle s'en sert abondamment et sans problème. La production restreinte de déchets, les moindres besoins en énergie, l'utilisation de matières premières inoffensives, non toxiques et renouvelables ainsi que le rendement élevé sont autant de facteurs qui garantissent la durabilité de cette technologie. Les processus de biotechnologie industrielle sont de plus en plus utilisés dans le secteur chimique et affichent généralement un résultat très positif tant sur le plan de la durabilité que sur celui de la compétitivité.

Il importe de souligner que la biotechnologie industrielle n'occupe pas ce créneau de façon isolée. L'ensemble de la chimie durable se fonde sur une synergie adéquate entre différentes technologies parmi lesquelles la biotechnologie industrielle ne fait pas figure de panacée. En effet, il apparaît souvent dans la pratique qu'une combinaison appropriée de technologie chimique traditionnelle et de biotechnologie industrielle donne des résultats remarquables. Les nouveaux processus sont souvent des synthèses dites combinées, qui se décomposent en une succession d'étapes chimiques et biotechnologiques. De même, les innovations techniques dans le domaine de la décomposition - notamment les procédés à membrane et l'utilisation de solvants supercritiques - sont intégrées plus fréquemment dans les processus et contribuent également à l'éco-efficience de la chimie verte.

La chimie durable

La chimie durable est une chimie respectueuse de l'environnement, qui réduit la production de déchets et la consommation d'énergie et qui opte résolument pour l'utilisation de matières premières renouvelables, tels les produits agricoles, plutôt que des matières fossiles telles le pétrole et le gaz naturel.

3. Biotechnologie

3.1. La Biotechnologie : une notion évolutive.

Au sens large du terme, la biotechnologie recouvre l'exploitation contrôlée de cellules vivantes (plantes, animaux et micro-organismes) ou de leurs composantes à des fins utiles. Ce concept élargi comprend donc également l'agriculture, la sylviculture et l'élevage sous toutes leurs formes. Cette biotechnologie traditionnelle constitue en réalité la principale activité industrielle sur Terre depuis longtemps, et elle fournit à l'humanité sa nourriture, ses vêtements, ses matériaux de construction et de nombreux autres produits extraits de la nature, tels les médicaments, le papier, le caoutchouc, etc. Jusqu'à présent, cette biotechnologie s'est essentiellement appuyée sur des produits et des activités in vivo (sur le terrain) d'origine végétale et animale mais également - même si elle demeure le plus souvent invisible, de produits et de l'activité de cellules microbiennes dans le sol, dans le système digestif des animaux, dans le compostage, etc., où elles jouent un rôle crucial dans l'accomplissement des cycles naturels du carbone, de l'azote et du soufre.

La biotechnologie moderne atteint un degré plus avancé de maîtrise de ces processus biologiques car elle y intervient de façon rationnelle en modifiant de façon ponctuelle le matériel génétique (ADN) des organismes ainsi qu'en pratiquant la culture in vitro (dans le bioréacteur d'une usine) de micro-organismes, de cellules animales et végétales aux fins de produits de synthèse utiles et pour réaliser des processus que l'agriculture classique ou la chimie, s'ils pouvaient les accomplir, ne pourraient le faire avec une efficacité comparable.

La biotechnologie

Bien qu'il n'existe pas encore de définition univoque de la biotechnologie qui soit communément acceptée, la Fédération européenne de Biotechnologie (EFB) propose la définition suivante : « On entend par biotechnologie l'intégration des sciences naturelles et des sciences de l'ingénieur en vue de l'utilisation d'organismes, de cellules, de certains de leurs éléments et de leurs analogues moléculaires pour obtenir des produits et des services. »

La biotechnologie recouvre donc l'utilisation d'organismes vivants ou d'éléments de ceux-ci pour fabriquer ou modifier des produits, pour améliorer des plantes ou des animaux, ou encore pour développer des micro-organismes à des fins spécifiques.

La biotechnologie classique comprend notamment les techniques traditionnelles d'élevage et d'agriculture ainsi que l'utilisation de bactéries, de levures et de moisissures pour la fabrication de pain, de bière, de vin, de fromages, etc. par des procédés de fermentation classiques.

La biotechnologie moderne poursuit le développement de ces techniques à un niveau plus élaboré : elle utilise les techniques génétiques pour modifier les propriétés des bactéries, des plantes et des animaux en intervenant directement sur le support d'informations qui contient toutes les caractéristiques de chaque organisme, à savoir l'ADN.

3.2. Qu'est-ce que la biotechnologie industrielle ?

La biotechnologie industrielle est l'application de la biotechnologie moderne pour la production industrielle de produits chimiques et de bioénergie, qui utilise des cellules vivantes et leurs enzymes, développant ainsi des processus intrinsèquement propres, générant moins de déchets et consommant moins d'énergie. Cette technologie se sert de préférence de matières renouvelables, mais pas exclusivement. La microbiologie industrielle fait surtout référence à l'utilisation de micro-organismes et d'enzymes - génétiquement modifiés ou non - pour fabriquer des produits et des matériaux utiles dans les domaines de la chimie et de l'alimentation, dans les secteurs des soins de santé et de la production d'énergie, etc. Ces cellules peuvent être comparées à de véritables « nano-usines » pour la transformation de matières premières renouvelables, le plus souvent d'origine végétale, comme les sucres et les huiles, en produits chimiques en vrac, en produits de chimie fine, en produits de base pour l'industrie pharmaceutique, en biocarburants, en plastiques biologiques, etc.

Le terme de « biotechnologie blanche » devient peu à peu un terme consacré : le blanc, symbolisant une technologie propre et durable, a été choisi pour différencier la biotechnologie industrielle de la « biotechnologie rouge », orientée vers la médecine, et la « biotechnologie verte », axée sur l'agriculture, par ex. modification génétique des plantes.

La biotechnologie industrielle est une technologie pluridisciplinaire qui recouvre une application intégrée de disciplines telles la biochimie, la microbiologie, la génétique moléculaire et la technologie des procédés dans le but d'élaborer des processus utiles sur base de cellules microbiennes, animales ou végétales, leurs organites ou leurs enzymes étant utilisés au titre de biocatalyseur. Les micro-organismes ont fait l'objet d'une attention toute particulière en leur qualité d'instrument biotechnologique et sont utilisés dans les procédés dits de fermentation. Nombreuses sont les bactéries, levures et moisissures utiles qui se rencontrent abondamment dans la nature mais dont le milieu naturel réunit très rarement les conditions optimales pour leur croissance et la formation de substances. Dans un environnement artificiel (in vitro), le biotechnicien peut intervenir de façon ciblée tant sur l'environnement microbien des cellules (dans un fermenteur ou un bioréacteur) que sur leur matériel génétique (l'ADN), afin d'orienter le métabolisme cellulaire pendant ces procédés de fermentation. Les micro-organismes, en raison de l'inimaginable diversité de leur capacité de synthèse à partir de matières premières renouvelables, de la vélocité des réactions microbiennes, de leur croissance rapide et de leur matériel génétique aisément modifiable, ont déjà été promus au rang de cheville ouvrière des divers secteurs de la biotechnologie industrielle. Leur efficacité maximale les a rendus irremplaçables dans de nombreux procédés.

Dans les secteurs des soins de santé, de l'industrie alimentaire et de la chimie fine, la biotechnologie industrielle est restée relativement discrète pendant longtemps. À présent, alors que le développement durable est devenu un véritable mot d'ordre, cette technologie acquiert ses lettres de noblesse dans le secteur des produits chimiques en vrac et de l'approvisionnement en énergie.

Une étude de McKinsey (Bachmann, 2002) indique que la part de marché de la biotechnologie industrielle aura considérablement augmenté dans tous les domaines d'ici 2010, et tout particulièrement dans le domaine de la chimie fine. Le taux de pénétration escompté pour 2010 se situe entre 30 et 60 % pour la chimie fine et entre 6 et 20 % pour les polymères et les produits chimiques en vrac. Pour l'ensemble de l'industrie chimique, ce taux de pénétration atteint aujourd'hui 5 %, devrait passer à 10-12 % d'ici 2010 et continuer à progresser ensuite. La vitesse de pénétration dépendra d'un certain nombre de facteurs, notamment le prix du pétrole et des matières premières d'origine agricole, des

progrès technologiques ainsi que de la volonté politique de soutenir et d'encadrer cette technologie.

La biotechnologie industrielle

La biotechnologie industrielle - également connue sous le nom de biotechnologie blanche - est l'application de la biotechnologie moderne pour la production industrielle de produits chimiques et de bioénergie, qui utilise des cellules vivantes et leurs enzymes, développant ainsi des processus intrinsèquement propres, générant moins de déchets et consommant moins d'énergie.

4. La Biotechnologie industrielle et la chimie

4.1 Les matières premières renouvelables ou fossiles

L'utilisation de matières premières renouvelables à des fins techniques (non nutritionnelles) n'est certes pas récente. Cet usage remonte aux civilisations les plus anciennes. Pour satisfaire ses besoins de base en vêtements, énergie, matériaux de construction, etc., l'homme a mis en œuvre des matières végétales et animales telles que des fibres naturelles pour ses habits, du bois de chauffage, de la graisse animale pour s'éclairer, des colorants naturels pour ses œuvres d'art.

Les premières activités industrielles ont aussi fait appel aux matières premières renouvelables, et ce jusqu'à la révolution industrielle. Au 19^{ième} siècle l'essor de la carbochimie (sur base du charbon, des aromatiques dérivés et du gaz de synthèse) initia un profond changement poursuivi au 20^{ième} siècle par l'envol de la pétrochimie. L'usage des matières premières renouvelables subit une forte contraction, principalement sous l'effet des prix extrêmement bas des produits pétroliers. Le développement considérable de l'industrie chimique à la même époque fut réalisé systématiquement à base de produits pétroliers. C'est aujourd'hui l'origine d'une bonne part des produits chimiques, de même que les besoins énergétiques de notre société sont largement couverts par des combustibles fossiles comme le charbon, le pétrole et le gaz naturel. Actuellement 95,8 % de tous les produits chimiques organiques fabriqués en Europe, en ce compris les combustibles, sont élaborés à base de matières premières fossiles.

Une série d'activités industrielles classiques et importantes utilisent toujours néanmoins des matières premières renouvelables. L'industrie textile utilise encore à peu près pour moitié des fibres naturelles (coton, laine, lin, ...). L'industrie des oléagineux satisfait nos besoins d'hygiène journalière (savon, détergents, cosmétiques, ...) à partir d'huiles végétales, et celle de la construction emploie toujours beaucoup de bois et autres fibres naturelles comme matériaux de construction. La pétrochimie n'est pas une alternative valable dans pas mal d'applications. Ainsi par exemple presque tous les antibiotiques sont produits par fermentation de sucres naturels, et environ une moitié de nos médicaments sont extraits d'organismes vivants.

La crise du pétrole de 1973 à 1979 où les prix ont été poussés par l'organisation des pays exportateurs de pétrole (OPEC) de 2 à 30 US\$ / baril (un baril = 159 litres) a relancé l'intérêt des matières premières renouvelables. Cette crise a sans aucun doute accru nos préoccupations d'une dépendance croissante des matières premières fossiles et de leur épuisement. L'idée fut reprise à des fins largement politiques en question énergétique, et suscita pas mal d'études sur le développement de sources d'énergie alternatives. Les résultats de ces études étaient très dispersés, mais montraient le plus souvent que les combustibles renouvelables n'étaient pas (encore) compétitifs. Et l'enthousiasme retomba comme un soufflé dès que les prix du pétrole diminuèrent et que l'économie retrouva son train-train habituel.

Dans les années nonante une nouvelle impulsion naquit des discussions sur le développement durable et l'effet de serre, avec l'arrivée des verts. Le problème des excédents alimentaires en Europe nourrit aussi des controverses. Le coût exorbitant du stockage de toutes sortes d'excédents de nourriture entraîna l'Union Européenne à prendre en main la politique agricole. L'UE développa à cet effet en 1992 le concept de terrains mis en friches. Le principe était d'accorder un subside aux fermiers qui laissaient des parcelles en jachère, de façon à limiter les excédents alimentaires. La politique agricole commune (CAP, Common Agricultural Policy) ouvrit ensuite l'option d'utiliser ces terres pour la culture de récoltes à usages non alimentaires. L'agriculteur pouvait ainsi gagner un supplément sur cette base.

La prise de conscience et les inquiétudes soulevées par les déchets industriels et leurs effets sur l'environnement créa aussi le besoin de produits intermédiaires et finis plus biodégradables. Les produits biodégradables ont la propriété de se transformer après un certain séjour dans le milieu en éléments repris par le cycle naturel, par opposition aux produits persistants qui ne s'éliminent pas du milieu ou des chaînes alimentaires, ou seulement avec un délai inacceptable. Pour certaines applications la biodégradabilité est cruciale ; ces matières sont aussi fréquemment produites à partir de matières premières renouvelables, vu leur biodégradabilité intrinsèque. De telles applications sont par exemple des produits chimiques qui se retrouvent à coup sûr dans l'environnement comme les huiles de graissage des tronçonneuses et des machines agricoles ou les détergents. C'est ainsi que les détergents verts comme les alkylpolyglucosidés ont déjà

conquis une importante part de marché, et sont entièrement issus de matières premières renouvelables (alcools gras et glucose).

Quant à l'épuisement des ressources pétrolières, on se trouve devant une situation paradoxale où la consommation de pétrole est plus élevée que jamais, mais où les "réserves prouvées" restent au même niveau depuis plus de trente ans suite à de nouvelles découvertes. Ces "réserves prouvées" se trouvent néanmoins dans des endroits de moins en moins accessibles et leur coût d'extraction et donc leur prix de revient augmente. Il s'ensuit que le prix du pétrole a une fâcheuse tendance à croître. Les produits agricoles par contre, comme la farine de maïs, deviennent toujours meilleur marché en raison fondamentalement de rendements agricoles toujours croissants, une tendance qui devrait vraisemblablement se poursuivre grâce notamment aux progrès de la "biochimie verte". Ces tendances à long terme sont bien sûr mêlées aux effets temporaires résultant des fluctuations des marchés et des déséquilibres politiques. Dans pas mal d'applications la balance économique penche ainsi vers les matières premières renouvelables, même dans le segment à bas prix des produits chimiques de masse. Le tableau suivant est très éclairant à ce sujet.

<u>Matière première</u>	<u>Prix mondial moyen (2003)</u> Euro par tonne
Charbon	30-65 (suivant région et type)
Pétrole brut	175
Maïs	80
Paille	20
Éthylène	400
Sucre	180

Sur base pondérale les matières premières agricoles renouvelables coûtent à peu près la moitié seulement des matières premières fossiles. Les sous-produits agricoles comme la paille sont même 10 fois moins chers que le pétrole brut. Il est tout aussi remarquable que les prix mondiaux actuels du brut et du sucre soient pratiquement égaux alors que le sucre est un produit fini très pur (99.8 %) et raffiné, tandis que le pétrole est une matière brute pleine d'impuretés, faite d'un mélange complexe de composés.

L'utilisation de matières premières renouvelables a donc clairement, pour toutes les raisons qui précèdent, le vent en poupe.

L'effet de serre et le protocole de Kyoto

Favorisée par la croissance d'origine anthropique de la concentration des gaz dits "à effet de serre", la température de la planète devrait continuer à augmenter. Le principal responsable est le CO₂ provenant principalement de la combustion de matières premières fossiles, le charbon, le pétrole et le gaz naturel. Bien que la croissance de la concentration en CO₂ soit subie depuis longtemps et que le mécanisme de l'effet de serre soit bien compris, le sujet n'a retenu l'attention du public qu'au début des années nonante. C'est surtout quand l'effet de serre peut être scientifiquement modélisé et ses conséquences estimées dans le cadre des conférences sur le climat (International Panel on Climate Change-IPCC) que les discussions prirent une tournure d'avalanches.

En 1997, le protocole de Kyoto, que la Belgique a signé, contient un plan de réduction à court terme des émissions de gaz à effet de serre. Ce protocole nous oblige à réduire nos émissions de gaz à effet de serre entre 2008 et 2012 de 7.5 % sous le niveau de 1990. Les émissions ont actuellement augmenté de plus de 7 % au-delà de la référence de 1990. En conséquence, nous avons encore 7 années pour réduire les émissions d'un facteur 14% pour respecter l'objectif de Kyoto.

La combustion de matières premières fossiles est épinglée comme première responsable de l'effet de serre, à côté d'autres facteurs comme la déforestation (tropicale) et la production accrue de méthane par l'agriculture et l'élevage (augmentation du méthane et du N₂O). Il est communément admis que l'emploi de matières premières renouvelables ne modifie pas le bilan du carbone de la planète et peut même au contraire l'améliorer. Le CO₂ libéré par la combustion de matières premières renouvelables est toujours fixé pendant la croissance de celles-ci de sorte qu'il ne se produit aucun accroissement net. Quand les matières premières renouvelables sont transformées en produits finis durables (par exemple en plastiques non biodégradables) il se produit même une diminution de la quantité totale de CO₂. L'utilisation de matières premières renouvelables en lieu et place de fossiles exerce donc un impact positif sur l'effet de serre.

4.2 Les matières premières renouvelables pour l'industrie

Les matières premières renouvelables sont essentiellement à base de "biomasse", la somme de toutes les matières qui composent le monde vivant. Les matières premières renouvelables ont donc en réalité une origine biologique. La base fondamentale en est

formée par la production végétale qui est fabriquée en continu par la photosynthèse, et conduit en fin de compte via l'intervention de production animale intermédiaire à une grande variété de biomasse disponible.

La production annuelle totale de biomasse sur notre planète est estimée à 170 milliards de tonnes par an sur terre se composant de 75 % d'hydrates de carbone (sucres), 20 % de lignine et 5 % d'autres matières telles que huiles et graisses, protéines, terpènes, alcaloïdes, etc (Okkerse & Van Bekkum, 1999). De cette production de biomasse terrestre 6 milliards de tonnes par an (3.5 %) servent aujourd'hui aux besoins humains selon la répartition suivante :

- 3.7 Gt (62 %) pour l'alimentation, éventuellement via l'animal comme intermédiaire
- 2.0 Gt (33 %) de bois pour l'énergie, le papier et la construction
- 0.3 Gt (5 %) pour les besoins techniques (non alimentaires) de matières premières (habillement, détergence, chimie,...)

Le reste de la production de biomasse sert l'écosystème (les animaux sauvages mangent aussi), est perdu en cours d'élaboration de biomasse pour l'homme (surtout par incendie) ou disparaît par processus naturels de décomposition.

Les matières premières renouvelables en question proviennent pratiquement toutes des agri- et sylvi-cultures. L'élevage et la pêche fournissent un complément (principalement des graisses animales) mais sont significativement moins importants, vu aussi la faible efficacité de la conversion tristement faible des plantes en animaux (environ 10-25 %).

La biomasse disponible peut être transformée par une série de technologies industrielles en matières premières renouvelables ou en vecteurs énergétiques. Cette activité industrielle est souvent confondue avec le secteur de l'alimentation, étant donné que les matières premières pour l'alimentation et les matières premières renouvelables pour les applications techniques peuvent être préparées dans une seule et même fabrique à partir de la même source agricole. Ainsi par exemple le sucre ou le glucose sont aussi bien produits pour l'alimentation humaine que comme matière première la plus importante des procédés industriels de fermentation.

A ce point de vue, les secteurs industriels suivants présentent l'importance des matières premières renouvelables de base les plus utilisées :

- Le secteur du sucre et de l'amidon : à partir de matières premières végétales comme la betterave sucrière, la canne à sucre, le blé, le maïs, la pomme de terre, le manioc ou le riz, ce secteur produit des carbohydrates comme le sucre, le glucose, l'amidon et la mélasse.
- Le secteur de l'huile et des oléagineux : à partir de matières premières végétales comme le colza, le soja, le palmier, la noix de coco, et de graisses animales, ce secteur produit une quantité d'intermédiaires oléochimiques comme les triglycérides, les acides gras, les acides gras insaturés, les alcools gras, les émulsionnants et la glycérine.
- Le secteur du bois, et en particulier l'industrie de la cellulose et du papier : à partir essentiellement de bois, ce secteur produit la cellulose, le papier et des lignines.

Ces secteurs traitent les matières premières végétales pour les séparer en constituants particuliers comme : sucre, amidon, cellulose, glucose, protéines, graisses, lignines. Ces industries s'appuient sur deux piliers technologiques :

- La technique du fractionnement : cette technologie fait principalement appel à des techniques physiques et chimiques pour décomposer les matières agricoles et le bois en leurs différents composants.
- La technologie enzymatique : ce pan de la biotechnologie industrielle intervient lors de la transformation des produits agricoles. En pratique, on utilise principalement des enzymes d'hydrolyse qui par exemple hydrolysent l'amidon en glucose.

Bien que les deux technologies soient clairement de nature différente, c'est la synergie entre les deux qui entraîne le succès. Ainsi la technique du fractionnement est fortement influencée par l'emploi d'enzymes hydrolysantes.

Les matières premières purifiées de base obtenues (sucres, amidon, cellulose, huiles) peuvent être transformées en une très large gamme de produits, en mettant en œuvre des procédés aussi bien physiques que chimiques et biotechnologiques.

L'amidon et la cellulose sont modifiés chimiquement en dérivés à applications multiples dans la vie courante. Les sucres comme le sucrose et le glucose sont liés chimiquement à des produits gras pour la synthèse de détergents et d'émulsionnants.

Parmi les procédés biotechnologiques industriels il faut mentionner en priorité la fermentation. Cette importante technologie clé met en œuvre des micro-organismes (bactéries, levures et champignons) pour transformer les matières premières de base comme les sucres et les huiles en une variété pratiquement illimitée de produits. En effet

un simple changement d'organisme producteur peut transformer la matière (par ex. le sucre) en produits entièrement différents, allant de produits dont la structure chimique est proche de la matière première (ex. l'acide gluconique à partir de glucose) jusqu'à des dérivés qui à l'extrême n'ont plus rien de commun avec le point de départ (par ex. des antibiotiques, des enzymes, ...).

Il n'est pas rare que tout cet enchaînement d'étapes de procédés différents faisant appel à diverses techniques s'effectue dans un seul et même complexe de production. On utilise alors aussi le vocable de "bio-raffinerie", par analogie avec la pétrochimie (voir encart).

A titre indicatif le tableau suivant reprend les chiffres de production mondiale estimée et les prix d'une série de matières premières renouvelables et de produits pétrochimiques. Le rapprochement montre clairement l'analogie des volumes et des prix.

	Production mondiale estimée (Millions de tonnes par an)	Prix indicatifs (Euro par tonne)
Matière première renouvelable		
Cellulose	320	500
Sucre	140	180
Amidon	55	250
Glucose	30	300
Bio-éthanol	26	400
Acide glutamique	1	2.000
Produits pétrochimiques		
Éthylène	85	400
Propylène	45	350
Benzène	23	400
Acide téréphtalique	12	700
Isopropanol	2	700
Caprolactame	3	2.000

La bio-raffinerie

Les bio-raffineries sont des complexes de production étendus où les matières agricoles sont traitées, fractionnées en produits intermédiaires et transformées en produits finis qui souvent ont très peu de ressemblance avec la matière végétale d'origine. Ces bio-raffineries font appel à des procédés autant physiques que chimiques et biologiques, où la technique de la fermentation et de catalyse biologique se distingue par son importance. Cette technologie utilise des micro-organismes et leurs enzymes pour transformer des matières premières de base comme les sucres et les huiles en produits qui n'ont souvent plus rien de commun avec la matière de départ. Le simple changement de l'organisme producteur permet de transformer une seule et même matière première en produits entièrement différents.

Voici à titre d'exemple des produits obtenus au départ du seul maïs :

- *glucose (un sucre naturel) comme matière première nutritive*
 - *acide citrique comme additif alimentaire*
 - *bio-éthanol comme carburant automobile*
 - *bio-plastiques (polylactates), utilisables comme matériaux d'emballage et fibres textiles*
 - *dérivés carboxylés de l'amidon, comme constituants de poudres à laver*
 - *lysine, comme additif d'aliment pour bétail*
 - *antibiotiques, comme matière pharmaceutique active en santé*
 - *vitamines, pour l'alimentation humaine et animale*
 - *bio-colorants, pour l'industrie alimentaire*
 - *biopolymère xanthate, comme agent de viscosité dans nombre d'applications*
- etc.*

Ces vastes complexes de production sont quant à leur structure d'organisation très comparables à l'industrie chimique, qui se trouve souvent elle aussi liée à une raffinerie pétrolière intégrée voisine. La différence fondamentale est l'emploi de matières premières renouvelables (agricoles) par les bio-raffineries, alors que les raffineries de pétrole et l'industrie chimique classique partent de matières premières fossiles comme le pétrole et le gaz naturel.

Les matières premières renouvelables en Belgique : Réalité ou fiction ?

La discussion du sens raisonnable ou non des matières premières renouvelables se heurte souvent à une approche exclusivement belge de la question. On arrive alors inexorablement au constat que la Belgique et surtout les Flandres ont trop peu de surface agraire pour produire assez de matières premières renouvelables. Ce constat qui entraîne la réduction ou même la négation de toute importance des matières premières renouvelables pour notre pays, est comme jeter le bébé avec l'eau de son bain. Avec la même argumentation, la pétrochimie et l'industrie chimique dérivée n'auraient jamais vu le jour en Belgique. En pratique, il faut bien constater que, malgré l'absence de ressources belges en pétrole, l'industrie chimique qui le transforme constitue une part importante du tissu économique du pays. La contribution de l'industrie chimique au PNB n'est aujourd'hui pas moins de 6,1 %, et pas moins de 14 % du total export belge.

Il est vrai que la surface agraire de la Belgique est limitée, et en grande partie consacrée à produire des aliments, compte tenu de la forte densité de population du pays. La Belgique a néanmoins un rôle très important à jouer en matière de traitement de matières premières agricoles (importées) et leur transformation en une vaste palette de produits chimiques ou bio-combustibles. La valeur ajoutée se trouve d'ailleurs plus dans le traitement industriel technologiquement intensif de ces matières premières agricoles, que dans leur production primitive par l'agriculture.

À côté d'une industrie chimique puissamment développée, notre pays présente des atouts sérieux pour l'industrie agro-alimentaire, qui est à la base de l'emploi des matières premières renouvelables. La Belgique est située au cœur européen de cette branche d'industries. Le secteur de l'amidon est très actif et innovant en matières premières renouvelables. Il existe là pour la Belgique une position très favorable : Le secteur de l'amidon est en Europe fait d'un oligopole de quatre grands groupes, dont deux des joueurs les plus importants, Cerestar et Amylum, ont établi leur quartier général et leur centre de recherches en Belgique, à Vilvorde et à Alost respectivement. Le joueur numéro trois est le français Roquette avec son quartier général et son centre de recherches juste de l'autre côté de la frontière près de Lille. Seul le quatrième joueur, Avebe, se trouve plus loin à Groningue, Pays-Bas. Suite aux fusions, absorptions et autres bouleversements qu'elle a connus, l'activité R&D de pratiquement tout le secteur européen de l'amidon s'est retrouvée concentrée en Belgique et à proximité (Lille). La base de

sociétés et l'éventail industriel pour un développement de ces technologies sont donc très certainement bien présents en Belgique.

L'industrie du sucre est aussi traditionnellement très présente en Belgique et a fourni bien des preuves d'audace et d'innovation pour le développement de nouvelles matières premières comme l'inuline de chicorée ou l'acide lactique de sucre (Orafti, industries Warcoing et Galactic).

L'industrie des oléagineux donne elle aussi le ton pour l'emploi des matières premières renouvelables. Un des principaux acteurs de ce domaine est établi en Belgique (Oléon, à Ertvelde et Oelegem).

L'affirmation souvent entendue que les matières premières renouvelables sont peut-être bien intéressantes pour des pays comme les États-Unis ou le Brésil, mais pas pour l'Europe et certainement pas pour la Belgique et moins encore pour les Flandres, doit aussi être vigoureusement combattue. Les prix actuels des principales matières premières agricoles sont très comparables en Europe et aux États-Unis. Ainsi le froment coûte en mai 2003, malgré le cours élevé de l'euro, pratiquement la même chose à Chicago qu'à Rouen. La surface cultivable nécessaire pour produire ces matières premières agricoles est d'autre part parfaitement présente en Europe : les greniers de l'Europe sont juste à la frontière française et les pays de l'est européen avec leur gigantesque potentiel agricole sont comparables au Moyen-Orient, d'où nous tirons une bonne part de nos besoins de pétrole, et même relativement encore plus proches.

4.3. Les procédés « Bio » de la biotechnologie industrielle

4.3.1. Les procédés de fermentation

Une très grande variété de produits chimiques de base et de chimie fine sont déjà produits par la biotechnologie : par ex. alcool, acide lactique, acide citrique, vitamines, acides aminés, solvants, antibiotiques, biopolymères, bio-pesticides, enzymes industrielles, bio-pigments, bio-surfactants, alcaloïdes, stéroïdes, etc... La principale technologie clé est ici la fermentation industrielle où des microorganismes (bactéries, levures et/ou moisissures) sont cultivés et transforment efficacement les sucres en produits désirés. Pour beaucoup de matières, cela représente la seule méthode industrielle de production et ces produits sont alors produits en quantités considérables grâce aux procédés de fermentation. Le tableau ci-après reprend les chiffres de production et les prix de quelques produits. La gamme varie depuis des produits de masse bon marché jusqu'à des spécialités de chimie fine très coûteuses :

	Production Mondiale Tonnes/an	Prix marché mondial €/Kg
Bio-éthanol	26.000.000	0,40
Acide L-Glutamine	1.000.000	1,50
Acide citrique	1.000.000	0,80
L-Lysine	350.000	2
Acide Lactique	250.000	2
Vitamine C	80.000	8
Acide gluconique	50.000	1,50
Antibiotiques (en vrac/commodités)	30.000	150
Antibiotiques (spécialités)	5.000	1.500
Xanthate	20.000	8
L-Hydroxyphénylalanine	10.000	10
Dextrose	200	80
Vitamine B12	15	25.000

Grâce à la technologie « recombinante » ADN, on peut modifier le matériel génétique de ces micro-organismes. D'une part, le métabolisme de ces micro-organismes peut être en partie ou complètement modifié (appelé « engineering métabolique »). D'autre part, des gènes d'organismes supérieurs (animal, végétal) ou d'autres micro-organismes (levure, bactérie, virus, algues) peuvent être implantés dans ces micro-organismes industriels et conduits à leur « expression ». Donc, des modifications génétiques sur des organismes peuvent modifier leur métabolisme et conduire à la production de matières chimiques avec une plus grande efficacité que par les procédés de fermentation industrielle classiques.

Dans la pratique, on utilise des modifications bien connues, bien productives et non dangereuses de ces micro-organismes qui grâce à cette modification vont fabriquer les produits chimiques désirés. Un grand avantage est aussi que ces micro-organismes modifiés génétiquement vont effectuer leur travail nécessaire dans un milieu bien contrôlé et bien isolé du monde extérieur, enfermés dans un réacteur de fermentation. Ils ne peuvent donc pas s'échapper en dehors de l'usine.

Aucun problème lié à la sécurité écologique ne peut donc être invoqué ici et n'est de nature à modifier l'environnement extérieur.

4.3.2. Les procédés enzymatiques

Les enzymes sont naturellement des accélérateurs de réaction bio-chimique ; on parle dans ce cas de « bio-catalyseurs ». Les enzymes sont des molécules à propriétés catalytiques qui, pour la plupart, ont subi une évolution dans la nature et se sont perfectionnées depuis des milliards d'années. Comme catalyseurs très spécifiques et efficaces, elles peuvent diriger la chimie de la vie sans température extrême, ni haute pression ou conditions corrosives qui souvent sont nécessaires dans les synthèses au moyen de procédés chimiques classiques. Les enzymes sont des machines du monde vivant et leurs propriétés surprenantes sont utilisées de plus en plus dans l'industrie : on parle du domaine de l'utilisation de la « bio-catalyse ».

Les enzymes sont devenues essentielles dans une très large gamme de secteurs industriels qui réalisent les réactions chimiques au moyen de la bio-catalyse.

Généralement, il s'agit d'enzymes microbiennes qui sont fabriquées par procédés de fermentation (voir § précédent). Suivant l'évolution des nouvelles technologies comme les modifications mutagéniques et génétiques dirigées, de nouvelles enzymes peuvent être fabriquées sur mesure : cette technologie permet d'améliorer encore davantage les synthèses et de conduire à des applications complètement nouvelles.

Parmi les applications classiques, citons l'utilisation à grande échelle des enzymes dans le secteur des amidons ; ainsi que le secteur qui est à la source du glucose, une des matières renouvelables les plus importantes. Une enzyme clé ici est l'alfa-amylase, une enzyme thermiquement très stable qui est utilisée pour hydrolyser l'amidon à une température d'environ 105 °C. De la même manière, des enzymes stables thermiquement permettent aujourd'hui de réaliser des réactions à hautes températures et qui accélèrent très fortement ces réactions. Une autre enzyme importante dans ce secteur est l'isomérase glucose. Cette enzyme, transformant le glucose en fructose, peut être immobilisée dans une forme qui garde jusqu'à deux ans ses propriétés catalytiques dans le cadre d'un usage industriel ! La production mondiale de fructose avec l'aide de cette enzyme a atteint depuis quelques années déjà le cap de 15 millions de tonnes par an.

Une des applications les plus connues des enzymes se situe dans le secteur du nettoyage (lessive) où les protéases et lipases sont introduites dans les poudres à lessiver pour casser et éliminer les taches organiques ou graisseuses des vêtements.

L'industrie des aliments pour bétail est également une application très développée des enzymes. Dans ce cas par ex., la « phytase » extraite de la moisissure « *Aspergillus niger* » permet de libérer les phosphates de l'acide phytine des aliments pour bétail.

L'utilisation d'enzyme est de plus en plus développée dans l'industrie chimique.

L'importance majeure ici est la spécificité de la réaction enzymatique qui permet souvent une sélectivité plus grande que dans les réactions chimiques classiques. A côté d'une plus grande spécificité, la « chiralité » a donné une impulsion très grande au développement des bio-catalyseurs (voir « encadré »)

L'emploi des enzymes (généralement sous la forme immobilisée) est aussi fortement en développement pour des réactions très élégantes et remarquablement spécifiques de réactions organiques. Il s'agit principalement de réactions réalisées en une étape avec une grande efficacité, de manière très spécifique et à très grande vitesse. Souvent on parle du domaine scientifique de la « biocatalyse » comme procédés de « Bio-conversion » ou « Bio-transformation ». Ces « bio-conversions » sont généralement réalisées à température et pression ambiantes et aucun produit intermédiaire, sous-produit ou rejet dangereux n'est rejeté. Les réactions sont souvent effectuées dans un solvant « vert » comme l'eau, l'éthanol ou le CO₂ supercritique mais ces enzymes peuvent être aussi actives dans les solvants habituels de l'industrie chimique, tels que le méthanol, acétone, solvants chlorés, etc.

Chiralité et biocatalyse

La « chiralité » est le terme qui est utilisé dans certaines molécules où il existe deux formes, appelées « forme gauche » ou « forme droite ». Sans aller trop loin, la comparaison peut être faite avec la main humaine où on a deux formes, « gauche » et « droite » mais qui sont identiques à tout autre point de vue. Ainsi, il en est de même pour certaines molécules chimiques qui peuvent réagir dans les milieux biologiques de manière très différente. Un exemple classique, mais dramatique, est l'histoire du « softenon », un médicament des années 60, où une forme permettait de contrôler les naissances mais où l'autre forme pouvait conduire à des déformations importantes des fœtus à la naissance (ainsi nommés les « bébé softenon »). En fait, le monde biologique est fondamentalement « Chiral » et la « chiralité » des molécules est donc d'une grande importance pour leur comportement biologique.

Ainsi, les catalyseurs chimiques classiques ne se distinguent pas dans les synthèses et conduisent aux deux formes « chirales ». Dans les synthèses de produits actifs pour l'industrie des médicaments ou des pesticides, il est important de fabriquer seulement une forme qui est active. L'autre forme dans le meilleur des cas est inoffensive mais constitue une perte de matière. Dans le cas plus néfaste, l'autre forme peut conduire à des résultats désastreux, comme le cas du « softenon ». Cette forme dangereuse doit donc être évitée, ce qui n'est pas évident du point de vue technologique. Cela conduit souvent à des pertes importantes et peut conduire à la formation de résidus dangereux.

Par contre avec la « bio-catalyse », on utilise des enzymes, bio-catalyseurs qui sont issus du monde biologique et donc plus efficaces pour des réactions sélectives : elles sont pratiquement toujours sélectives en « chiralité » et permettent la synthèse de l'une ou l'autre forme.

Dans le domaine de la « pharmacie » et de l'« agrochimie », il existe une demande importante pour l'usage des molécules « chirales » et il n'est donc pas étonnant que cette application de la « bio-catalyse » la plus importante à ce jour soit la synthèse des médicaments ou des produits « agrochimiques » et leurs intermédiaires de synthèse.

4.4. Les produits basés sur la biotechnologie industrielle

Un large éventail de produits utiles peut être produit par la biotechnologie industrielle. Ces produits sont classés dans les différentes catégories de produits de la chimie fine, de la pharmacie, des additifs alimentaires et suppléments, des colorants, des vitamines, des pesticides, des bio-plastiques, des solvants, des produits chimiques à large volume et des bio-fuels.

Ces produits se classent dans le domaine des produits chimiques de masse à faible prix (ex. éthanol : 26 Mt/an à 400 €/t) jusqu'aux produits de chimie fine très coûteux (ex. vitamine B12 : quelques tonnes/an à 25.000 €/kg).

Alors que la biotechnologie industrielle est déjà bien établie pour la production de produits de chimie fine et pharmaceutiques, les produits chimiques de masse, comme les bio-fuels et les bio-plastiques commencent seulement à être produits au moyen de la biotechnologie industrielle. Dans certains cas, l'élément de base d'un plastique (le monomère) est produit par les ressources fossiles en utilisant une technologie enzymatique. Dans d'autres cas, un polymère complètement biodégradable peut être obtenu à partir de ressources renouvelables (ex. le bio-plastique PLA à partir de maïs).

La biotechnologie industrielle peut intervenir en une seule étape dans la synthèse chimique et remplacer une cascade entière de plusieurs étapes réalisées en une seule opération de fermentation. La synthèse de la vitamine B2 (riboflavine : 4000 t/an) en est un exemple. Le procédé conventionnel consiste en une synthèse combinée chimique-biotechnologique de 8 étapes.

Cette synthèse combinée a été récemment remplacée, grâce à la biotechnologie, par une synthèse de riboflavine en une seule étape de fermentation avec l'aide d'une bactérie, d'une levure ou d'un champignon (respectivement Roche, ADM et BASF). Le coût de production de ce nouveau procédé biotechnologique est réduit de 40% par rapport au procédé conventionnel.

L'**ANNEXE A**, à la fin du document, donne la description d'un ensemble de produits issus de la biotechnologie industrielle. La technologie de production, les applications et les marchés sont également présentés.

4.5. Les avantages économiques et écologiques de la biotechnologie industrielle

L'application d'étapes de procédé biotechnologique dans des synthèses chimiques a conduit à des avantages écologiques significatifs comme une réduction importante de résidus, une demande d'énergie plus faible, une moindre utilisation de solvants, une limitation des produits intermédiaires dangereux, etc. Ces facteurs écologiques ne constituent presque jamais le facteur décisif pour ce changement technologique.

L'amélioration du procédé technologique et la réduction des coûts de production sont presque toujours les raisons principales d'une telle décision. Les avantages écologiques constituent un effet secondaire intéressant, mais ne sont en général pas suffisants pour motiver les responsables à introduire cette nouvelle technologie (avec risque d'échec).

La biotechnologie industrielle combine le motif économique avec le progrès écologique : l'augmentation de l'efficacité et la réduction des coûts de production de tels procédés conduisent à une diminution de l'impact écologique et à une meilleure compétitivité.

Un rapport de l'OCDE de 2001 (« The Application of Biotechnology to Industrial Sustainability ») cite 21 cas d'études qui illustrent les avantages écologiques de la biotechnologie industrielle. Il est également important de signaler que dans beaucoup de cas ces procédés sont utilisés de manière industrielle, sont compétitifs au niveau économique et ont dépassé le stade des études théoriques ou des projets de recherche. Citons dans ce contexte, le facteur E. Ce facteur mesure l'efficacité de l'industrie chimique en termes de kg de résidus par kg de produit. Les produits chimiques de masse ont un facteur E allant de valeurs inférieures à 1 jusqu'à 5, les produits de la chimie fine se trouvent entre 5 et 50 et les produits pharmaceutiques montent même jusqu'à 100. Les résidus de la chimie organique sont le plus souvent de sels inorganiques et des solvants.

La société Biochimie (Autriche) donne des chiffres pour la transformation de la céphalosporine C en l'acide 7-aminocephalosporane (7-ACA), un produit intermédiaire très important dans la synthèse des antibiotiques semi-synthétiques à base de céphalosporine comme la céphalothine et céphaloglycine (production mondiale environ 2000 t/an). Le procédé chimique classique, comportant plusieurs étapes, utilise des réactifs toxiques comme la N,N-diméthylaniline, $(\text{CH}_3)_3\text{SiCl}$ et PCl_5 , ainsi que des solvants chlorés. La plupart des effluents résiduels doivent être incinérés vu l'empoisonnement des

installations d'épuration d'eau. Le procédé a lieu à très basse température, ce qui implique une consommation importante d'énergie.

La direction de la société Biochimie a décidé en 1995 d'abandonner la synthèse chimique et de la remplacer par la voie biotechnologique. La céphalosporine C, obtenue par fermentation (avec la moisissure *Acremonium chrysogenum*) est ensuite transformée par un procédé enzymatique en l'acide glutaryl-7-aminocefalosporane en utilisant l'enzyme D-aminoacide oxidase. Ce produit est ensuite transformé en 7-ACA par une autre enzyme, la glutaryl amidase. Ce bioprocédé utilise deux enzymes naturelles et remplace la voie chimique classique utilisant le pentachlorure de phosphore, des sels de zinc et des solvants. Le procédé biotechnologique n'utilise aucun réactif toxique et travaille à température ambiante. Le solvant utilisé est presque complètement éliminé. Les résidus les plus importants sont des solutions aqueuses venant de la fermentation, traitées sans problèmes dans les installations biologiques d'épuration des eaux, et le résidu mycélium utilisé comme engrais. L'utilisation de l'incinération pour le traitement des résidus toxiques a diminué de 31 kg/kg 7-ACA jusqu'à 0.3 kg.kg 7-ACA, ce qui représente une réduction d'un facteur 100 !

La firme DSM (Pays-Bas) produit la 7-ADCA (l'acide 7-aminodeacétoxycefalopsorane) comme produit intermédiaire de la synthèse d'antibiotique semi-synthétique à base de céphalosporine, la céphalexine. De 1975 jusqu'à 1985, la céphalexine était produite par un procédé comportant dix étapes de chimie conventionnelle et produisant une quantité de résidus de l'ordre de 30-40 kg par kg de produit fini. Le procédé chimique a été optimisé de nombreuses fois et par l'introduction du recyclage, le rapport résidu/produit a été réduit à 15 kg en 1985. Pendant l'année 1995, la société DSM-Chemferm a introduit un procédé biocatalytique, comparable avec celui de la société Biochimie, avec comme résultat une diminution des résidus jusqu'à moins de 10 kg par kg de produit fini. Il s'en est suivi le développement d'un procédé de fermentation par la société DSM, produisant en une seule étape la 7-ADCA. Ce produit intermédiaire est ensuite transformé en céphalexine par synthèse chimique. Le procédé initial, comportant dix étapes, pour la fabrication de la céphalexine était ainsi réduit à un procédé de quatre étapes, avec une réduction des coûts de 50% et de 65% pour la consommation énergétique. En plus d'une réduction importante de la quantité de résidus, une réduction de la toxicité a également été obtenue (voir tableau). Le procédé original utilisait le chlorure de méthyle, les réactifs de silylation, les subchaînes protégées par des sels de Dane, les promoteurs d'acylation, Le nouveau procédé rejette uniquement des effluents aqueux contenant des sels inorganiques.

L'utilisation prochaine de la biotechnologie moderne (comme metabolic pathway engineering) donnera peut-être la possibilité de réduire encore le nombre d'étapes. On pense modifier l'organisme de production de telle façon que la céphalexine ou un produit intermédiaire puisse être obtenu par fermentation directe, avec le potentiel de réduire l'effluent jusqu'à 2-5 kg/kg céphalexine.

4.6. La bio-énergie

4.6.1. Les perspectives de la bio-énergie

Une grande partie des matières premières disponibles dans notre société est utilisée pour la production d'énergie. Ainsi, 85% des matières premières fossiles comme le pétrole, le gaz naturel et le charbon servent à couvrir nos besoins en énergie. L'utilisation de ces ressources fossiles pour la production d'énergie est soumise aux mêmes contraintes que celles déjà mentionnées, à savoir le caractère fini de ces matières premières et les conséquences négatives de leur utilisation sur l'environnement, en particulier via l'effet de serre. Il est par conséquent prioritaire de développer l'usage de sources d'énergie renouvelables comme l'énergie hydraulique, l'énergie solaire, l'énergie éolienne, l'énergie des marées, l'énergie géothermique et l'énergie de la biomasse. Tant les matières premières renouvelables que la biotechnologie peuvent jouer un rôle décisif dans notre approvisionnement énergétique, et aussi bien la biotechnologie verte, pour améliorer la production de biomasse, que la biotechnologie industrielle (blanche), pour la conversion de la biomasse en énergies utilisables ou en carburants.

Certains processus biotechnologiques industriels ont une importance particulière pour la conversion de biomasse en combustibles utilisables. La valeur d'un combustible n'est pas déterminée uniquement par son contenu énergétique, mais également par la forme physique sous laquelle il se trouve et sa facilité d'utilisation. En théorie, le bois de chauffage peut servir de carburant automobile; cependant, l'utilisation de ce carburant sera très peu efficace et très peu pratique. La production de bio-éthanol à partir de betteraves sucrières permet au contraire d'obtenir un carburant compact, transportable et pratique à l'usage, qui peut être mélangé avec l'essence normale et être utilisé sans problème sans nécessiter d'adaptation des moteurs. Le bio-éthanol s'intègre aussi parfaitement dans le concept actuel de mobilité, basé sur des véhicules à moteur à combustion interne utilisant des combustibles liquides et disponibles à la pompe. De même, le bio-éthanol ne nécessite pas de changement des pratiques agricoles actuelles (culture des betteraves sucrières).

La production de biocombustible nécessite des procédés de conversion de la biomasse. Ces procédés font partie des procédés biotechnologiques industriels à mettre en œuvre dans les "bio-raffineries" mentionnées plus haut. L'analogie avec la pétrochimie est à nouveau frappante : une voiture ne roule pas avec du pétrole brut, mais bien avec l'essence qui résulte du raffinage du pétrole.

La production de bio-fuels devait conduire à stimuler le développement de bio-raffineries. Une fois créée l'infrastructure pour ces bio-fuels dans ces grandes raffineries, de nouvelles possibilités seront ouvertes pour la production de substances chimiques plus complexes. Cela est similaire au début du développement de l'industrie pétrochimique : initialement on produisait du « fuel » mais ensuite l'ensemble de l'industrie pétrochimique s'est développé en aval.

L'**ANNEXE B** à la fin du document donne la description des technologies, applications et marchés pour les différents types de bio-fuels.

Le bio-éthanol est obtenu à partir de sucres de betteraves ou de cannes, blé ou maïs par fermentation et peut être utilisé en mélanges avec l'essence normale (pétrochimique). Le bio-diesel est produit à partir d'huiles végétales telles par ex. l'huile de colza ou de pépins de raisins ; ce bio-diesel peut être mélangé aussi sans problème avec le diesel actuel (pétrochimique).

Le biogaz est obtenu par fermentation anaérobique de déchets divers et peut être brûlé pour produire de l'électricité et de la chaleur.

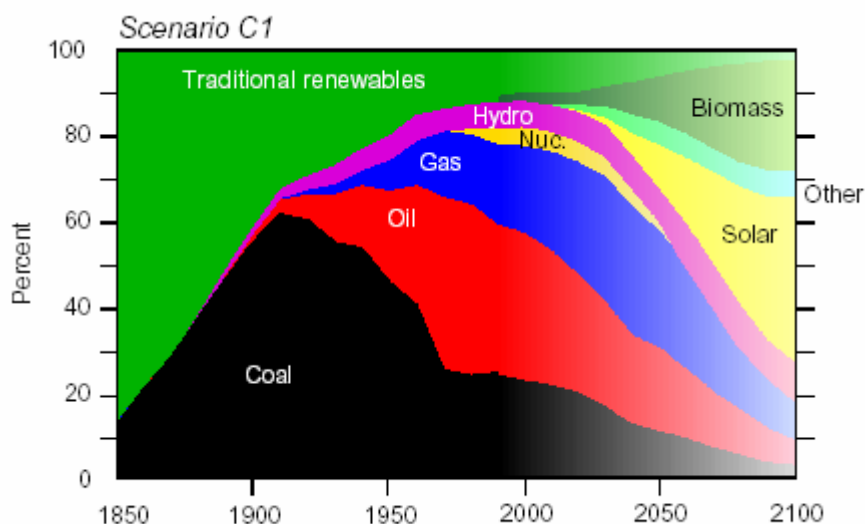
Les carburants renouvelables conventionnels comme le bois de chauffage et les autres usines énergétiques ne sont pas considérés ici car ils ne sont pas concernés par la biotechnologie industrielle, de même le potentiel de la « biotechnologie verte » pour améliorer les rendements des cultures ou les conditions de cultures est en dehors du cadre de cette étude.

4.6.2. La consommation mondiale d'énergie et le potentiel offert par la biomasse pour la fourniture d'énergie.

L'avenir de notre approvisionnement énergétique et la contribution que la biomasse peut y apporter sont des questions importantes. De nombreuses études ont déjà été consacrées à ces questions et nous n'en relèverons ici que les éléments principaux.

Différents scénarios énergétiques ont été envisagés et donnent des résultats différents. Ces résultats dépendent essentiellement de l'incertitude sur le moment où les réserves mondiales de matières premières fossiles seront épuisées, de l'incertitude sur la croissance de la population mondiale et sur la vitesse du développement économique de la population dans les pays en voie de développement.

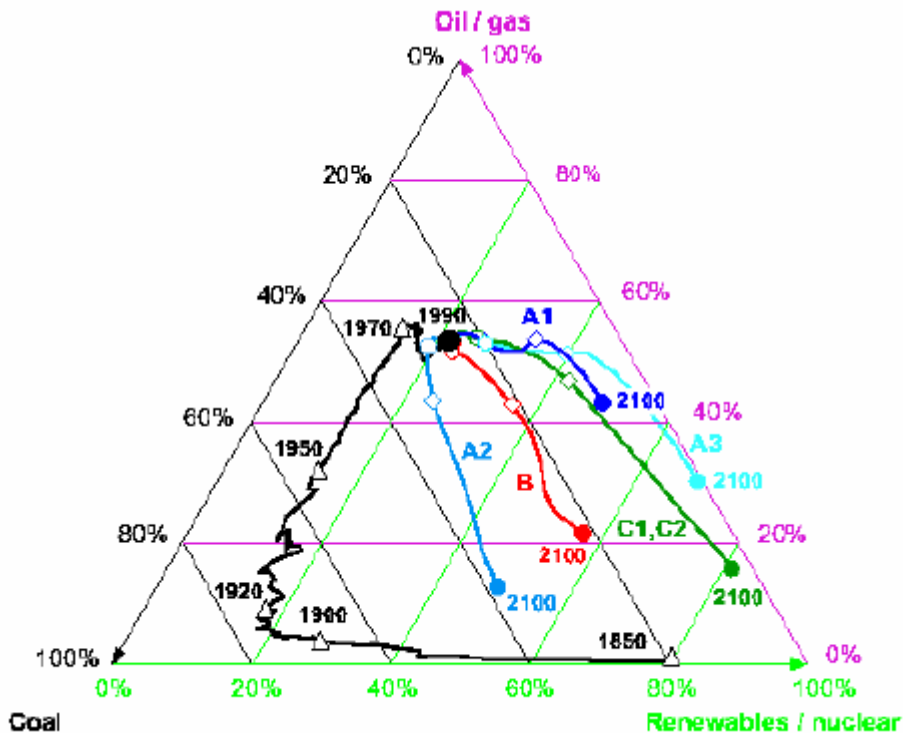
Il est généralement accepté que le pétrole sera épuisé d'ici 50 ans, le gaz naturel d'ici 65 ans et le charbon épuisé d'ici 200 ans. Les réserves prouvées de pétrole correspondent à moins de 40 ans au rythme de consommation actuel; au cours de la dernière décennie, cette espérance de vie a continuellement diminué au rythme d'une demi-année par an. Il en est de même pour le gaz. Dans une grande étude sur les perspectives énergétiques globales réalisées par le Conseil Mondial de l'Energie (World Energy Council), différents scénarios d'avenir ont été envisagés et analysés en détail (voir figure).



Le scénario "C1" correspond à une politique fortement orientée sur la protection de l'environnement et le développement économique du tiers monde. Le scénario se base sur une population mondiale de 10 milliards d'habitants en 2050 et 12 milliards en 2100. Les besoins énergétiques triplent d'ici 2050 et quintuplent en 2100, par rapport à 1990. Dans ce scénario, on remarque que la consommation de pétrole et de charbon est en décroissance claire à partir de 2000 (voir figure), tandis que la consommation de gaz reste

encore stable pendant les 50 prochaines années, avant de se réduire. L'énergie nucléaire couvre seulement une petite partie de nos besoins d'énergie et disparaît complètement d'ici 2050. L'énergie solaire et la biomasse se développent fortement à partir de l'an 2000 pour couvrir ensemble plus de la moitié de nos besoins en 2100. La part des sources d'énergie renouvelables utilisées de manière traditionnelle, comme le bois de chauffage, diminue continuellement.

La figure suivante résume l'itinéraire énergétique des différents scénarios envisagés (A,1, A2, B, C1, C2). On remarque que malgré la diversité des scénarios, ils tendent tous inexorablement vers la même zone où toute l'énergie provient de sources renouvelables (ainsi qu'une part restreinte d'énergie nucléaire), zone de laquelle nous nous sommes écartés à partir de 1850.



Quelques chiffres clés

La consommation annuelle d'énergie est actuellement (2003) estimée à 420 EJ (ExaJoules = 10^{18} J) pour 6 milliards d'habitants, correspondant à une consommation d'énergie moyenne de 2.200 W/personne ($1 \text{ W} = 1 \text{ J.s}^{-1}$). Cette moyenne cache de très grandes inégalités (par ex. 30 W/personne au Bangladesh contre plus de 10.000 W/personne aux USA, 6500 W/personne dans les pays de l'OCDE et 7600 W/personne en Belgique). Cette consommation d'énergie est actuellement couverte à raison de 79 % par les sources d'énergie fossiles, subdivisées en pétrole (35 %), gaz

naturel (23 %) et charbon (21 %). L'énergie nucléaire et hydraulique couvre ensemble 9 % de la consommation. Les 12 % restants sont couverts par des sources renouvelables, surtout la biomasse traditionnelle (bois de chauffage), l'énergie du vent et l'énergie solaire (calculé d'après BP Statistical Reviews).

Une prévision pour 2040 est une consommation d'énergie annuelle globale de 935 EJ pour 10 milliards d'habitants, soit 3.000 W/personne.

La source fondamentale de toute l'énergie sur la terre est le rayonnement solaire (mis à part l'énergie nucléaire) : celui-ci apporte une quantité d'énergie gigantesque, soit $3,8 \cdot 10^{24}$ J par an, ce qui correspond à 4.000 fois le besoin d'énergie annuel de l'humanité attendu en 2040. La quantité totale d'énergie solaire est donc très grande. Cependant, la quantité d'énergie réellement utilisable n'est qu'une fraction de cette quantité totale. Cette fraction dépendra fortement des technologies avec lesquelles l'énergie solaire sera collectée et convertie en énergie utile. L'énergie solaire peut être collectée de manière directe par les capteurs solaires thermiques et photovoltaïques. Elle peut aussi être collectée de manière indirecte sous forme de biomasse, qui résulte de la photosynthèse, processus de conversion de l'énergie solaire en énergie chimique. La biomasse est une forme de l'énergie solaire beaucoup plus aisément stockable à grande échelle que l'électricité et la chaleur. Le scénario C1 prévoit que les deux modes de collecte (direct et indirect) se développeront en parallèle et joueront un rôle similaire. Pour des raisons fondamentales de limitation de rendement, l'énergie provenant de la biomasse restera cependant limitée à un certain pourcentage, tandis que l'utilisation directe d'énergie solaire peut s'accroître vers des limites plus élevées.

Certains calculs permettent d'estimer la limite des possibilités offertes par la biomasse pour notre approvisionnement énergétique :

Okkerse & Van Beynum (1999) sont partis d'hypothèses assez optimistes de rendements de biomasse par ha fortement accrus et un accroissement significatif de la quantité de terres cultivables d'ici 2040. Ils concluent à une quantité de biomasse totale récoltée de 65 milliards de tonne par an sur $5 \cdot 10^9$ ha, soit environ 10 fois plus de biomasse qu'il n'est actuellement effectivement récolté par l'humanité. Ces 65 milliards de tonne pourront être utilisés comme suit :

- L'alimentation de 10 milliards d'habitants en 2040 nécessitera 15 milliards de tonnes de biomasse annuellement, produites sur 2 milliards ha de terres arables.
- La synthèse d'environ 1 milliard de tonnes de produits organiques nécessitera 5 milliards de tonnes de biomasse et rencontrera toute la demande de produits chimiques.

- Le restant, soit 45 milliards de tonnes de biomasse, pourrait être exploité pour la production d'énergie.

L'utilisation de ces 45 milliards de tonnes de biomasse à des fins énergétiques produira environ 200 EJ. En estimant la consommation d'énergie en 2040 à environ 935 EJ, la biomasse peut ainsi apporter une contribution maximale d'environ 20% à l'approvisionnement énergétique mondial. Dans un scénario plus optimiste avec "seulement" 8 milliards d'habitants et une consommation d'énergie de 1.500 W/personne, la biomasse récoltée peut couvrir environ 50% des besoins énergétiques.

Bien que cette contribution soit non négligeable, il est clair que l'approvisionnement énergétique d'une population future de 10 milliards d'habitants à raison de 3.000 W/personne est physiquement impossible en ne faisant appel qu'à la biomasse. Notre avenir énergétique passe par la mise en œuvre des différentes sources d'énergie complémentaires:

- la biomasse - énergie;
- l'énergie solaire thermique et photovoltaïque
- les autres sources renouvelables d'énergie comme l'énergie hydraulique, éolienne, géothermique,...

Mais aussi et surtout:

- la limitation de la consommation d'énergie, qui peut être obtenue par l'amélioration de l'efficacité énergétique et une utilisation plus rationnelle de l'énergie;
- la limitation (autant que possible) de la croissance de la population mondiale.

Il faut souligner l'importance considérable de la production animale. Une grande partie de la matière première végétale est en effet actuellement utilisée pour la production animale, avec un taux de conversion particulièrement inefficace. Si l'humanité passait à une alimentation plus végétarienne, de grandes quantités de biomasse végétale issue des terres cultivables pourraient approvisionner la production d'énergie. Dans un monde futur surpeuplé et sans matières premières fossiles, l'humanité devra probablement choisir entre manger de la viande ou circuler en voiture.

Tous les calculs et simulations montrent clairement que, quel que soit le scénario, nous allons rapidement nous heurter aux limites physiques de disponibilité des ressources naturelles et qu'une gestion raisonnée et durable de notre terre est plus que jamais nécessaire.

4.6.3 Les Directives européennes, politique agricole et détaxation des bio-fuels

Le parlement européen a approuvé le 8 avril 2003, la première des deux directives qui doivent stimuler le développement des biocarburants en Europe. Les carburants utilisés par les véhicules sont particulièrement visés. La mesure concerne donc le bio-éthanol et le bio-diesel. Le secteur des transports représente en effet 32 % de la consommation totale d'énergie de la communauté européenne.

La première directive (2003/30/EC) détermine les objectifs : d'ici 2005, 2 % de la consommation totale de carburant en Europe doivent être couverts par des biocarburants. Ce pourcentage minimum augmente progressivement pour atteindre 5,75 % d'ici 2010 et un objectif de 20 % en 2020. Le taux de biocarburant utilisé n'est actuellement que de 0.3 %, très inégalement réparti entre les différents pays membres de l'Union européenne. Pour atteindre ces objectifs, l'Europe devra produire 9,3 millions de tonne de bioéthanol en 2010, ce qui nécessitera 3,7 millions d'hectares de blé et de betteraves sucrières. Ce chiffre mérite d'être comparé avec les 5,6 millions d'hectares de terres cultivables mises en jachère, que la Communauté Européenne finance pour empêcher les agriculteurs d'y cultiver des produits agricoles utiles.

Une deuxième directive européenne (amendement 92/81/EC) régleme les conditions d'utilisation des biocarburants, en particulier les aspects fiscaux. Ces aspects fiscaux sont particulièrement importants étant donné que l'Europe a traditionnellement une taxation particulièrement élevée des carburants d'origine pétrolière, les taxes représentant plus de la moitié du prix des carburants à la pompe.

Les partisans du développement des biocarburants (parmi lesquels les milieux agricoles) sont d'avis que les biocarburants ne doivent pas être taxés étant donné qu'ils permettent de réduire la consommation de pétrole et qu'ils ont un meilleur bilan environnemental. Les opposants (essentiellement les groupes pétrochimiques) indiquent qu'une détaxation des biocarburants induirait une distorsion de concurrence en défaveur des carburants pétroliers.

La directive règle cette question et autorise la défiscalisation des biocarburants. La directive laisse aux États membres le choix de la défiscalisation complète ou partielle des biocarburants, en fonction de la volonté politique propre à chaque État membre. Chaque État membre peut choisir par lui-même la formule qui lui permettra le mieux d'atteindre les objectifs de la première directive. La transposition de cette directive dans les lois

nationales mène déjà à des différences importantes dans les pratiques de chaque pays. Ainsi, l'Allemagne a choisi de défiscaliser complètement les biocarburants, ce qui lui permet de promouvoir fortement l'utilisation de bio-diesel. D'autres pays comme la France ont opté pour une défiscalisation partielle des biocarburants, qui sont moins taxés que les carburants pétroliers.

On doit garder à l'esprit qu'une conséquence importante de la détaxation est une apparente perte de revenus fiscaux pour les gouvernements. Le climat économique actuel, avec des déficits croissants dans les budgets de la plupart des pays européens, est à cet égard peu favorable à la défiscalisation. Les partisans des biocarburants montrent que l'opération est globalement positive, y compris pour les gouvernements. Le coût des biocarburants est finalement converti en revenus pour les agriculteurs qui fournissent la matière première et pour les bio-raffineries qui la transforment en biocarburants. Ces revenus stimulent le développement économique intérieur et l'emploi, au profit de tout le monde, y compris du gouvernement qui peut percevoir plus d'impôts sur les revenus de ces activités. Ces revenus restent en effet dans le pays, contrairement à l'argent servant à payer le pétrole qui contribue surtout au développement de l'économie des pays du Moyen-Orient.

Un argument additionnel est que tant qu'à soutenir les agriculteurs européens, autant les laisser produire des biocarburants plutôt que de les obliger à laisser leurs terres en jachère. De cette manière, les subsides pourraient être remplacés par les revenus que l'agriculture obtiendrait de la vente des biocarburants, ce qui lui permettrait de redevenir un secteur normal où règne l'économie de marché.

En d'autres mots, défiscaliser les biocarburants permettrait d'acheter notre énergie en Euro à des travailleurs européens qui, grâce aux emplois ainsi maintenus et au pouvoir d'achat dont ils disposeront, contribueront au développement économique, social et environnemental européen. Il s'agit là d'une alternative au système actuel qui consiste à acheter notre énergie en Dollars, dont le cours fluctue, et de financer des pays exportateurs de pétrole qui redistribuent leur pouvoir d'achat selon leurs propres critères de développement économique, de justice sociale, de respect des droits de l'homme et de l'environnement, ... Leurs critères ne sont pas toujours compatibles avec les valeurs défendues au niveau européen.

5. Évolution sociétale et technologique dans les années à venir

Un certain nombre de bouleversements sociétaux et technologiques sont attendus dans les années à venir, et ceux-ci modifieront en profondeur la structure de notre société. S'il est prévu que cette évolution sera progressive dans son ensemble, elle peut néanmoins donner lieu à des « ondes de choc » tout à fait perceptibles. Pour assimiler ces changements en profondeur sans dommages, notre société doit revoir les fondements technologiques sur lesquels elle s'appuie. Dans ce cadre, le groupe de travail estime que le développement de la biotechnologie industrielle jouera un rôle de tout premier plan.

5.1. Évolution des flux de matières premières primaires

Il est à prévoir que, dans un avenir proche, les sociétés prendront davantage conscience du fait que les combustibles fossiles, et en particulier le pétrole, ne sont pas inépuisables. Le pétrole est un élément primordial au sein de notre structure sociale et technologique car il s'agit en même temps du premier fournisseur de matières premières et de la principale source d'énergie. Par conséquent, on peut raisonnablement s'attendre à ce que l'élaboration de matières premières alternatives - en particulier sur base de la biomasse - soit fortement encouragée. Quoiqu'il en soit, tout le monde s'accorde à penser que la seule question qui demeure ouverte est de savoir quand ce revirement aura effectivement lieu : personne ne doute que ce changement se produira tôt ou tard.

5.2. Croissance démographique et augmentation de la demande en matières premières et en énergie

Actuellement, près de 80 % de l'ensemble des matières premières et ressources disponibles sont utilisés par quelque 20 % de la population mondiale. On peut raisonnablement s'attendre à ce que ces 80 % de la population mondiale œuvrent avec détermination pour élever leur niveau de vie et revendiquent une plus grande part des réserves de matières premières et d'énergie de notre planète. En outre, il y a lieu de garder présent à l'esprit que la population mondiale ne cesse d'augmenter à une vitesse vertigineuse.

Les effets du « ralentissement de la croissance de la population », souvent cités et souvent mal interprétés, ne seront guère ressentis avant plusieurs générations, justement à cause des caractéristiques propres à la dynamique de croissance. Dans un premier temps, la croissance se poursuit sans discontinuer. Il convient notamment de prendre en

compte la dynamique de la Chine et de l'Inde, étant donné qu'il est prévu que ces pays fortement peuplés rattraperont leur retard économique à court et à moyen terme.

Cette évolution conduira inéluctablement à une demande accrue de matières premières et d'énergie. Il semble qu'une « redistribution » des ressources disponibles soit irréaliste, de sorte qu'on observera certainement une augmentation de la consommation d'énergie. Tout cela donne à penser que les matières premières fossiles seront épuisées d'autant plus vite, ce qui ne manquera pas de propulser les matières premières et l'énergie renouvelables à l'avant-plan.

5.3. La demande accrue d'efficacité dans les systèmes chimiques de production

Sous la pression des réalités économiques, il y a lieu d'augmenter constamment le rendement des systèmes de production. Dans le passé, des systèmes de production caractérisés par un gaspillage à grande échelle et générant des quantités considérables de déchets pouvaient rester économiques tant que les déchets pouvaient être entassés dans l'environnement ou que les coûts pouvaient être transférés à la société. En vertu du principe du « pollueur-payeur », de tels systèmes de production sont aujourd'hui voués à leur perte. Les déchets coûtent de l'argent, d'abord parce qu'il faut s'en débarrasser, ensuite parce que tout rebut constitue par essence une perte de rendement avec tous les coûts qui s'ensuivent. Par conséquent, les procédés chimiques doivent répondre à des critères d'efficacité très élevés et se montrer très performants. Les méthodes fondées sur la catalyse biologique sont souvent très efficaces et se caractérisent par une faible production de déchets et une réduction de la consommation de matières premières et d'énergie. De fait, la pénétration de la biotechnologie industrielle dans l'industrie chimique est le plus souvent étayée par des motifs économiques traditionnels comme la réduction des coûts, l'augmentation du rendement, l'amélioration des produits, etc.

En outre, on peut s'attendre à ce que les facteurs abordés aux points 5.1 et 5.2 conduisent inévitablement à une hausse des prix des matières premières et combustibles fossiles, ce qui ne manquera pas de rendre plus aiguë la demande d'efficacité dans les processus. Cela stimulera sans aucun doute la poursuite de la pénétration de la biotechnologie industrielle dans l'industrie chimique, en synergie avec la chimie traditionnelle.

5.4. Le besoin impérieux d'une durabilité des systèmes de production

Depuis les accords de Kyoto, la plupart des pays industrialisés sont tenus de respecter certains critères fondamentaux en ce qui concerne les matières premières et la politique énergétique. En particulier, la problématique des émissions de CO₂ fait l'objet d'une attention soutenue : notre pays et de nombreux autres pays ont déjà pris des engagements en la matière dans le cadre du Protocole de Kyoto. Le principe des droits d'émission négociables est déjà mis en pratique et, en 2008 – 2012, les amendes pour avoir dépassé les normes d'émission deviendront une réalité. Tout cela engendrera une perception fondamentalement différente de la consommation de matières premières et de carburant. Il est manifeste que les ressources renouvelables neutres en ce qui concerne le CO₂ (la biomasse) ont tout à gagner dans cette évolution.

5.5. Évolution de la perception et des comportements des utilisateurs

Auparavant, le consommateur se posait uniquement des questions ayant trait à la qualité et au prix des produits qu'il consommait. Le consommateur contemporain s'interroge à présent sur les systèmes de production qui sous-tendent les produits et sur ce que deviennent les produits après leur utilisation (problématique des déchets, déductibilité, etc.). Les circuits de production dommageables pour l'environnement ou qui infligent des souffrances à des animaux, ceux qui s'appuient sur un commerce inéquitable ou une forme d'exploitation (le travail des enfants) sont de plus en plus souvent dénigrés, même si les effets négatifs se manifestent loin du consommateur et que celui-ci n'encourt pas de préjudice au sens strict du terme. Le consommateur recherche des biens et services produits et consommés dans des circonstances acceptables, qui ne le laisseront pas devant des dilemmes éthiques ou émotionnels.

L'aversion des européens à l'égard des organismes génétiquement modifiés est également conditionnée par cette évolution ; force est de constater qu'il n'est pas rare que les mêmes consommateurs qui rejettent les organismes génétiquement modifiés consomment sans sourciller - voire avec enthousiasme - des produits alimentaires obtenus par des procédés de fermentation, comme par exemple des produits laitiers fermentés et le Quorn, une mycoprotéine issue d'une moisissure.

La perception du consommateur par rapport aux « produits chimiques » (conservateurs, colorants, anti-oxydants, etc.) utilisés dans l'alimentation a également une connotation très négative et la demande d'alternatives « naturelles » est forte. On peut donc s'attendre à

ce qu'un certain nombre de ce type de produits soient progressivement remplacés par des produits issus de la biotechnologie industrielle.

5.6. Évolution de la politique agricole européenne

La politique agricole commune (PAC) de l'Union Européenne est actuellement en pleine mutation. Le secteur agricole européen n'aura manifestement pas d'autre choix que de s'adapter continuellement à de nouveaux besoins et problèmes, sous la pression des consommateurs, des pouvoirs publics et des partenaires commerciaux non-européens, en particulier les États-Unis et les pays du tiers-monde. L'élargissement de l'Union Européenne à de nouveaux états membres en Europe centrale et orientale exerce également une pression considérable sur l'organisation actuelle de la politique agricole.

Cette évolution est clairement marquée par les grandes orientations suivantes :

- on souhaite un secteur agricole moins axé sur la production (massive) et qui se tourne davantage vers la qualité des produits agricoles ;
- on souhaite un secteur agricole plus respectueux de l'environnement ;
- on souhaite réduire les subventions aux agriculteurs liées à la production agricole ;
- on souhaite progressivement supprimer les tarifs douaniers élevés frappant un certain nombre de produits agricoles, de façon à permettre aux pays du tiers-monde d'écouler leurs produits en Europe ;
- on envisage une plus grande diversité de systèmes de production agricoles, l'introduction de nouvelles cultures arables et de nouveaux systèmes de production, notamment l'agriculture biologique ;
- on souhaite encourager les cultures qui ne sont pas destinées au secteur alimentaire.

L'utilisation de matières premières agricoles au titre de matières premières renouvelables pour l'industrie chimique et de combustible répond manifestement à bon nombre de ces préoccupations. L'évolution dans ce sens suscite beaucoup d'enthousiasme, y compris dans les milieux agricoles, conscients de l'importance de ces nouvelles perspectives.

6. Recommandations politiques

Vu l'importance de la biotechnologie industrielle pour le développement de la société durable de l'avenir ;

Vu l'importance de la biotechnologie industrielle pour l'industrie belge en général et pour l'industrie chimique et l'agro-industrie belges en particulier ;

Vu l'importance de la biotechnologie industrielle pour le secteur agricole belge ;

Vu la mesure considérable dans laquelle la Belgique dépend de l'importation de matières premières fossiles, dont on prend conscience que les réserves s'épuisent ;

Vu l'absence d'une politique belge visant à stimuler et à développer la biotechnologie industrielle en Belgique :

Le groupe de travail CAPAS souhaite formuler un certain nombre de recommandations à l'intention des pouvoirs publics, du monde politique et du monde de l'industrie. Le groupe de travail espère que certaines des recommandations ci-après pourront se traduire par une politique aussi concrète qu'efficace en la matière. Idéalement, cette politique devrait être élaborée conjointement par les pouvoirs publics, les secteurs industriels concernés et les institutions de recherche. La création d'une « plate-forme technologique pour la biotechnologie industrielle » qui réunirait toutes les parties prenantes pourrait aboutir à un consensus entre le gouvernement, le monde industriel et le monde de la recherche, qui pourraient alors œuvrer en collaboration comme le décrit plus spécifiquement le point 6.4.

6.1. Recommandations aux pouvoirs publics belges

6.1.1. Les pouvoirs publics doivent mieux suivre le développement de la biotechnologie industrielle

Actuellement, l'attention qu'accordent les pouvoirs publics à la biotechnologie - et les mesures de soutien qui l'accompagnent - se tourne presque exclusivement vers la biotechnologie rouge (médicale) et verte (végétale). Ces secteurs méritent très certainement l'attention et le soutien des pouvoirs publics. Toutefois, force est de constater qu'un troisième secteur important, la biotechnologie industrielle, est encore systématiquement ignoré.

Par ailleurs, le niveau d'acceptation de la biotechnologie verte par la société européenne est très bas. C'est pourquoi presque chaque nouvelle avancée de cette technologie ne peut initialement être appliquée qu'en dehors de l'Europe. Bien que la perception du public puisse encore évoluer, il y a peu de raisons de faire preuve d'optimisme à ce stade.

En revanche, la biotechnologie rouge est socialement mieux acceptée et déjà bien implantée dans les grandes firmes pharmaceutiques, dont le centre de gravité se situe manifestement aux États-Unis.

La biotechnologie industrielle trouve une part importante de ses fondements industriels et technologiques dans l'industrie chimique et l'agro-industrie. L'Europe, y compris notre pays, ont des atouts non négligeables dans ces secteurs. À l'échelle mondiale, l'industrie chimique d'Europe est une des mieux développées, et la Belgique occupe une place de choix dans le peloton de tête. Bien que la population belge ne dépasse pas 2,7 % de la population de l'Union Européenne, l'industrie chimique belge représente :

- **8,2 %** du chiffre d'affaires de l'industrie chimique européenne ;
- **14,0 %** des exportations belges ;
- **6,5 %** des investissements réalisés en Belgique ;
- **6,1 %** de l'emploi en Belgique.

La part de l'industrie chimique dans l'ensemble de l'industrie de production et de transformation de notre pays s'élevait à 24 % en 2002.

L'agro-industrie est également très développée en Belgique et réalise 4,5 % du PIB belge. Les conditions annexes en faveur d'un développement intensif de la biotechnologie industrielle en Belgique sont favorables, et il y a lieu de capitaliser sur cet atout.

Lorsque l'Etat mène une politique de soutien, il convient qu'il se laisse guider par l'impact social et les perspectives d'avenir du secteur soutenu. Or la pertinence d'une attention et d'un soutien appuyés de la part des pouvoirs publics envers la biotechnologie industrielle est manifeste du point de vue social, puisqu'il s'agit d'une technologie qui sera à la base d'une société durable, comme l'expose le présent document.

Il est urgent que les pouvoirs publics développent une vision et une stratégie à long terme pour promouvoir la biotechnologie industrielle en Belgique. Actuellement, une telle vision brille par son absence tant à l'échelle du pays qu'à celle des régions. Il devrait être possible d'élaborer une telle vision et une telle stratégie pour les 20 ou 30 années à venir à partir de la plate-forme technologique pour la biotechnologie industrielle (voir le point 6.4.).

6.1.2. Les pouvoirs publics doivent accorder plus d'attention et de soutien à la recherche appliquée pluridisciplinaire qui élargit le champ des connaissances

Le domaine de la biotechnologie industrielle est par excellence un domaine pluridisciplinaire axé sur les applications et s'appuyant sur la biologie, la microbiologie, la biotechnologie moléculaire, la chimie ainsi que l'écologie et l'ingénierie.

La tendance qui domine actuellement la recherche au sein des universités et des institutions qui financent la recherche, tout particulièrement dans le domaine de la biotechnologie, est de s'orienter d'une part vers la recherche scientifique fondamentale, d'autre part vers la recherche appliquée, mais uniquement dans un nombre limité de secteurs « établis » (les secteurs pharmaceutique et agroalimentaire). Par ailleurs, la recherche appliquée n'est que trop souvent considérée comme une tâche réservée aux entreprises, sans envisager que les pouvoirs publics puissent s'y impliquer plus activement. Dans les nouveaux domaines de recherche, l'industrie elle-même se montre souvent plutôt frileuse, surtout en période de morosité économique. Pour de nombreuses entreprises, organiser la recherche dans un nouveau domaine avec un renouvellement technologique pour finalité dépasse leur capacité et leur ambition.

Par conséquent, les pouvoirs publics doivent soutenir la recherche appliquée dans ce domaine par le truchement de différents mécanismes, tant dans les entreprises elles-mêmes que dans les facultés de recherche appliquée des universités (ingénieurs).

Les pouvoirs publics doivent fournir un effort sérieux pour soutenir les initiatives de recherche et de développement menées par les universités. Cet effort peut adopter la forme de programmes de recherche spécifiques auxquels seraient accordés des budgets de recherche qui reflètent véritablement l'importance économique et sociale ainsi que les perspectives d'avenir de la biotechnologie industrielle pour notre pays. En mettant en place de tels programmes de recherche, il y a lieu de veiller à ce qu'ils couvrent tout le champ d'application de la biotechnologie industrielle, sans se cantonner, comme c'est trop souvent le cas, aux facettes génétiques (« génomique ») ou de biologie moléculaire du domaine de recherche. En effet, il ne faut surtout pas occulter l'importance de l'étude de la physiologie cellulaire, de la microbiologie, du génie métabolique, de la catalyse biologique, mais également de la technologie des bioprocessus qui fait appel aux ingénieurs.

Par ailleurs, on peut également subventionner l'expansion d'entreprises qui sont prêtes à s'engager dans ce domaine. Cela donne aux pouvoirs publics l'occasion de stimuler la collaboration entre l'industrie et les universités en apportant un soutien financier à de semblables projets entrepris en commun, par exemple en créant des « partenariats public-privé », éventuellement dans le cadre d'une plate-forme technologique pour la biotechnologie industrielle (voir le point 6.4.).

6.1.3. Prise de conscience de l'importance de la masse critique en Recherche et Développement

Les efforts de recherche entrepris dans notre pays et dans ses différentes régions sont très dispersés, sans qu'il existe une réelle coordination entre les différentes technologies et disciplines concernées. En outre, il y a un risque que la réforme imminente de l'enseignement tertiaire (accords de Bologne : diplômes Bachelor/Master) contribue à fragmenter davantage l'effort de recherche. Le groupe de travail est d'avis que les universités doivent continuer à fonctionner comme centres de recherche dans notre pays, de manière à conserver une masse critique en matière de Recherche et de Développement. En effet, les conséquences de la dispersion sont souvent néfastes : non seulement les groupes de recherche manquent souvent de cette masse critique de ressources humaines et matérielles mais, en matière de subventions destinées à la Recherche et au Développement, on constate que bien souvent une seule demande complète sur 10 aboutit effectivement à un financement, ce qui représente un gaspillage de temps, d'énergie et de ressources humaines.

Pour élaborer une stratégie et une vision à long terme, il ne suffit pas d'avoir une masse critique suffisante. Il existe actuellement un trop grand nombre de petits « îlots de recherche » qui continuent d'explorer séparément leur étroit domaine de recherche spécifique. Pour encourager la recherche en biotechnologie industrielle, il est nécessaire de constituer des pôles et des réseaux interdisciplinaires de recherche, des pôles de recherche qui peuvent se développer en de véritables « centres d'excellence ».

6.1.4. Mettre en lumière l'importance de la biotechnologie industrielle et en promouvoir la connaissance

La façon dont l'opinion publique perçoit la biotechnologie est plutôt négative dans l'ensemble. Il s'agit d'une nouvelle technologie qui évolue à une vitesse vertigineuse, qui est souvent présentée sous un mauvais jour dans les médias - pensez au clonage des êtres humains, à la malbouffe (« Frankenstein food »), etc. Comme la plupart des gens ne disposent pas même de connaissances élémentaires au sujet de cette technologie, il est aisé de lui forger une image négative.

Les potentialités de la biotechnologie industrielle offrent une excellente occasion d'améliorer cette image, notamment en mettant en lumière le lien étroit qui unit la biotechnologie industrielle au développement durable de notre société.

Dans ce contexte, le canal de l'enseignement mérite une attention particulière :

- Tout d'abord, il y a lieu de stimuler et de structurer l'enseignement de la biotechnologie dans l'enseignement secondaire. On pourrait par exemple encourager les enseignants à intégrer certains aspects de la biotechnologie dans leurs programmes de cours, en dehors du cadre restreint du cours de biologie : par exemple dans le cours de chimie, d'écologie, d'éthique, etc. Il faut également inciter les enseignants à entretenir et étoffer leurs connaissances générales en biotechnologie (tant pour la technologie que pour ses applications). Concrètement, on pourrait organiser des journées d'étude spécifiques dans le cadre des cours de recyclage des enseignants de biologie.
- Dans l'enseignement supérieur (et technique), la formation doit être orientée vers l'avenir et mieux axée sur les besoins des entreprises. La nécessité d'intégrer une plus grande interdisciplinarité dans les programmes est patente : les fondements de la biotechnologie doivent être assimilés dans les programmes d'études de biologie, de chimie, des sciences de l'environnement, d'ingénieur et de physique, mais également dans ceux des sciences humaines.

Il convient également de communiquer au grand public les possibilités offertes par la biotechnologie industrielle. Il y a un manque flagrant de connaissance et de conscientisation par rapport à la biotechnologie industrielle - tant dans l'industrie que chez les consommateurs ou dans le monde politique - et cela empêche d'aplanir une série d'obstacles. Il est impératif que les pouvoirs publics se mettent à jouer un rôle de catalyseur, par exemple en organisant des conférences et séminaires, en diffusant des brochures d'information, etc.

6.1.5. Élaboration de mesures politiques et fiscales de soutien

Pour promouvoir le développement industriel et les applications de la biotechnologie industrielle dans notre pays, un certain nombre de mesures politiques de soutien sont indispensables :

6.1.5.1. Défisiscalisation de la bio-énergie à l'échelle européenne

Les différents niveaux de pouvoir de notre pays doivent rapidement s'attacher à promulguer des lois nationales en application des directives européennes visant à promouvoir les biocarburants. La défiscalisation complète des biocombustibles n'apparaît pas comme une utopie et c'est donc une carte à jouer en priorité. Il ne faut pas sous-estimer l'importance cruciale de la définition rapide d'un cadre juridique adéquat. Les décideurs les plus rapides auront l'avantage de l'initiative et, à chaque nouveau ralentissement de la transposition des directives, l'industrie belge sera pénalisée. La position ou l'initiative belge en matière de biocombustibles sont pour ainsi dire inexistantes et la croissance de notre agro-industrie, compétente en la matière, s'en trouve assez compromise - à l'opposé de la situation que connaissent les concurrents allemands et français, dont la position de départ est favorisée par la politique proactive de leurs gouvernements respectifs. La masse critique, le travail à plus grande échelle et l'efficacité sont les mots d'ordre de cette industrie. Ceux qui tardent trop à prendre le train en marche ne rattraperont plus jamais leur retard.

Dans le cadre des accords de Kyoto qui, selon toute vraisemblance, ne seront pas respectés par la Belgique en 2010, il est plus que temps d'appliquer la notion de « mieux vaut tard que jamais ». La définition d'une politique bien structurée en matière de bio-énergie est devenue une priorité en Belgique, d'autant plus que cette politique est suffisamment étayée et structurée d'un point de vue européen. La Belgique n'a donc aucun intérêt à faire cavalier seul. Au contraire, si l'absence flagrante d'initiatives se prolonge, la Belgique court le risque d'être à la traîne dans ce domaine.

La mise en œuvre d'un projet bio-énergétique belge bien conçu pourrait offrir les avantages suivants :

- le projet bénéficierait de l'attention du public parce qu'il interpellera son imagination et que toute personne qui fait un plein d'essence y sera confrontée ;

- le projet contribuera directement à l'effort consenti pour atteindre les normes de Kyoto, ce à quoi la Belgique s'est engagée ;
- le projet soutient le développement de la biotechnologie industrielle et sera le coup d'envoi de l'implantation de raffineries biologiques en Belgique ;
- le projet jette un pont entre l'agro-industrie et l'industrie chimique et peut être à la base d'une meilleure compréhension et d'une collaboration pour de nouveaux projets communs ;
- le projet génère de nouveaux revenus pour le secteur agricole et améliore l'image de l'agriculture.

6.1.5.2. Mesures destinées à promouvoir le développement des (bio)produits et bioprocessus durables

La commercialisation des technologies et produits dont il est démontré qu'ils sont respectueux de l'environnement doit être fortement encouragée au moyen de mesures de soutien (fiscales et financières) spécifiques, afin de donner un sérieux coup de pouce à de tels systèmes de production et produits plus écologiques. Par exemple, si on instaurait l'obligation d'utiliser des emballages biodégradables pour certaines applications (jetables), cela favoriserait une conquête plus rapide du marché par de tels produits. Ce type de politique de soutien pourrait permettre à ces produits de réaliser des volumes de ventes considérables à court terme et donc de devenir concurrentiels par rapport aux matériaux d'emballage traditionnels. En l'absence d'une politique de soutien affirmée, ces derniers conserveront leurs parts de marché parce qu'ils ont une position dominante, bénéficient d'une technologie éprouvée, de lignes de production déjà amorties et d'une production rentable à grande échelle.

6.2. Recommandations aux autorités européennes

6.2.1. Élaboration d'une politique européenne en matière de biotechnologie industrielle

Bien que de nombreuses applications soient déjà connues, la biotechnologie industrielle n'en est qu'à ses premiers balbutiements en Europe. C'est pourquoi il est indispensable de mettre en place une politique européenne cohérente en la matière, tant pour mettre en œuvre des mesures ciblées qui aplaniront les obstacles gênant le développement de cette technologie respectueuse de l'environnement, que pour introduire des mesures concrètes de soutien destinées à renouveler les procédés industriels ou à les rendre rentables.

Cela s'inscrit parfaitement dans le cadre politique que l'Union Européenne s'est imposée elle-même. Au Conseil européen de mars 2001 à Stockholm, la Commission a attiré l'attention sur l'énorme potentiel économique, social et écologique des sciences du vivant et de la biotechnologie et a souligné la nécessité stratégique pour l'Europe, d'acquérir une maîtrise à long terme de ces sciences, des technologies y afférentes et de leurs applications. Dans sa communication « Vers une vision stratégique des sciences du vivant et de la biotechnologie », la Commission précise elle-même ceci : « Les sciences du vivant et la biotechnologie sont entrées dans une phase de croissance exponentielle offrant un vaste potentiel pour l'évolution des économies européennes et mondiales vers un développement plus durable et une meilleure qualité de vie. L'Europe doit donc accorder une importance stratégique à ces nouvelles sciences et technologies si elle souhaite devenir l'une des principales économies de la connaissance. Elle ne peut se permettre de passer à côté des possibilités qu'elles mettent à sa disposition. » Cela a abouti à un Plan d'action pour le développement de la biotechnologie en Europe, intitulé « Sciences du vivant et de la biotechnologie : Une stratégie pour l'Europe », feuille de route dans laquelle la biotechnologie industrielle figure en bonne place.

Parallèlement, l'Europe accorde beaucoup d'importance au développement durable. En juin 2001, le Conseil Européen a voté à Göteborg une stratégie pour le développement durable : « Développement durable en Europe pour un monde meilleur : stratégie de l'Union européenne en faveur du développement durable », dans laquelle il est notamment demandé à l'industrie de collaborer au développement et à l'utilisation de nouvelles technologies respectueuses de l'environnement. La nécessité d'une reconversion vers des processus de production plus durables n'est pas seulement un élément de la stratégie européenne en faveur du développement durable : elle constitue également un des objectifs énoncés dans le sixième programme d'action pour l'environnement de l'Union Européenne.

Ces nobles intentions doivent néanmoins encore se traduire par des actions pertinentes, ce qui n'est pas encore le cas aujourd'hui.

6.2.2. Accorder plus d'attention à la biotechnologie industrielle dans le cadre de la politique européenne en matière de Recherche et Développement

L'Union Européenne a récemment lancé un Plan d'action comprenant notamment l'augmentation des dépenses consacrées à la Recherche et au Développement jusqu'à 3 % du PIB, contre un niveau actuel de 1,94 % du PIB (« Plan d'action de l'UE pour

intensifier l'effort de recherche en Europe »). Il s'agit également d'un projet qui doit encore se traduire par des actes concrets. D'autre part, une augmentation des budgets de recherche ne constitue pas la panacée si ces ressources ne sont pas affectées avec discernement.

Le 6^e Programme cadre pour la recherche et le développement technologique en Europe est l'un des instruments politiques existants les plus efficaces de l'Union Européenne pour soutenir la Recherche et le Développement dans une série de domaines différents. Il est révélateur que la biotechnologie industrielle soit très peu présente dans le 6^e Programme cadre, qui est pourtant le principal incitant de l'Union Européenne en faveur de la recherche scientifique. S'il faut reconnaître que certains aspects de la biotechnologie industrielle, notamment la chimie durable et la bio-énergie, sont rattachés à différents thèmes du Programme cadre (certains aspects de la biotechnologie industrielle et de la chimie durable ont été inclus sous la rubrique de la « nanotechnologie », tandis que la bio-énergie est abordée sous la rubrique « développement durable », force est de constater qu'aucune priorité n'a été accordée à cette technologie (contrairement, par exemple, à la biotechnologie à usage médical ou les TIC). C'est pourquoi il est absolument indispensable d'accorder une plus grande attention à la biotechnologie industrielle dans un prochain programme cadre. La création d'une plate-forme technologique pour la biotechnologie industrielle peut servir de cadre : c'est une possibilité que la Commission Européenne a elle-même évoquée (« La politique industrielle dans une Europe élargie »).

Dans ce domaine, il est moins cinq. Si l'Europe n'agit pas rapidement, il en ira de la biotechnologie industrielle comme des autres branches de la biotechnologie, pour lesquelles les États-Unis ont conquis une place de leader mondial sur le plan technologique : certaines entreprises ferment déjà leurs divisions de recherche et les transfèrent aux États-Unis.

6.3. Recommandations à l'industrie belge

6.3.1. Mise en place d'une coopération entre l'industrie chimique et l'agro-industrie

Des exemples provenant d'autres pays (par exemple la vitamine C et le bio-plastique, cités à l'Annexe A points 6 et 5) démontrent à suffisance qu'une coopération entre l'industrie chimique et l'agro-industrie est une idée porteuse avec un très grand potentiel. Les deux secteurs d'industrie sont fortement développés en Belgique, c'est-à-dire que les conditions sont objectivement très favorables. Toutefois, la coopération entre les deux

secteurs est loin d'être facile : leurs habitudes, traditions industrielles et bases technologiques respectives sont fort divergentes. En Belgique, il n'y a guère d'exemples « éclairants » d'une coopération réussie dans ce domaine, et chaque secteur d'industrie vit sa propre vie.

L'industrie chimique belge est fortement ancrée à la pétrochimie. La proximité de raffineries de pétrole, par exemple à Anvers, n'y est certes pas étrangère. Il serait positif que l'industrie chimique belge examine les possibilités que la biotechnologie industrielle peut offrir sur le plan de la production et de ses activités de développement. Cette démarche aurait plusieurs objectifs : la découverte d'applications lucratives et d'améliorations rentables des procédés, mais aussi une forme de préparation à une prépondérance future des matières premières renouvelables. C'est d'ailleurs une des conclusions et recommandations de l'étude de projection technologique « De Chemische Industrie in Vlaanderen – Op weg naar 2010 » [*L'industrie chimique en Flandre - en route vers 2010*], qui a récemment été commandée par le Conseil flamand de la politique scientifique [*Vlaamse Raad voor Wetenschapsbeleid*].

L'argument affirmant que la Belgique n'est pas un pays agricole et n'offre donc guère de possibilités pour de telles activités est vide de sens. Les matières premières agricoles, tout comme le pétrole, peuvent être importées et servir de base à tout un ensemble d'activités chimiques entièrement nouvelles.

L'agro-industrie belge, également très évoluée, est unilatéralement axée sur la fourniture de matières premières à l'industrie alimentaire belge, elle-même fort développée. Cette priorité est opportune mais n'offre pas beaucoup de possibilités de croissance, car les besoins en alimentation sont limités et les marchés sont largement saturés. Chaque branche de l'agro-industrie s'attache à défendre ses acquis et adopte pour ce faire une stratégie défensive (on pense notamment à l'industrie sucrière, qui songe avant tout à préserver ses quotas). Une stratégie plus offensive dans le sens du développement de nouvelles activités dans le domaine de la biotechnologie industrielle pourrait se révéler nettement plus constructive. Par ailleurs, il existe des exemples de ce type de stratégie, comme la reconversion de vieilles raffineries de sucre en usine d'acide lactique (Galactic) ou d'inuline (Orafti).

6.3.2. Investir davantage dans la Recherche et le Développement

L'industrie doit investir davantage dans la Recherche et le Développement, tant en interne que par l'intermédiaire d'une collaboration extérieure, par exemple avec les universités. Si les entreprises européennes ne préparent pas une riposte adéquate, l'effort de recherche particulièrement ambitieux que les États-Unis consentent pour la biotechnologie industrielle menace de coûter très cher à notre industrie à moyen terme. Aussi l'industrie a-t-elle un rôle de premier plan à jouer dans la constitution de pôles de recherche interdisciplinaire ou dans la création d'une plate-forme technologique pour la biotechnologie industrielle (voir le point 6.4.).

6.3.3. Mettre en lumière l'importance de la biotechnologie industrielle et en promouvoir la connaissance

Il faut que l'industrie donne l'exemple. Pour provoquer une prise de conscience ou l'accentuer, pour influencer une perception (voir également le point 6.1.4), il serait souhaitable qu'un certain nombre d'exemples d'unités de production fondées sur la biotechnologie industrielle fassent l'objet d'une campagne de promotion explicite (brochures, visites, ...). Cela pourrait améliorer simultanément l'image de marque de l'industrie concernée et celle de la biotechnologie dans son ensemble.

6.4. Création d'une plate-forme technologique pour la biotechnologie industrielle

Afin d'élaborer une stratégie à long terme, il est indispensable de mettre en place une « plate-forme technologique pour la biotechnologie industrielle ». Une telle plate-forme technologique pourrait aboutir à un consensus entre le gouvernement, le monde industriel et le monde de la recherche, qui pourraient alors œuvrer en collaboration.

Toutes les parties concernées doivent être représentées au sein de cette « plate-forme technologique pour la biotechnologie industrielle » : l'industrie, le monde académique et les instituts de recherche, les représentants des associations de défense de l'environnement et des consommateurs, ainsi que les différentes autorités des états membres de l'Union Européenne et de la Commission Européenne. À partir de cette plate-forme, il convient de développer une stratégie à long terme non seulement en matière de recherche et de développement, mais également pour l'élaboration d'un cadre juridique approprié et cohérent ainsi que la mise en œuvre des mesures nécessaires pour

intégrer cette technologie dans la société. La Commission Européenne a déjà évoqué et situé clairement la possibilité de telles plates-formes technologiques dans certaines de ses communications (« Plan d'action de l'UE pour intensifier l'effort de recherche en Europe » et « Politique industrielle dans une Europe élargie »).

Les autorités locales doivent également se montrer actives, en particulier lorsqu'il s'agit de développer les points forts spécifiques d'une région. Compte tenu de la forte concentration de son agro-industrie et de son industrie chimique, la Belgique semble appelée à développer le concept des « bio-raffineries » et à participer au progrès technologique de la biotechnologie industrielle, en vue de développer une chimie durable pour l'avenir.

7. Conclusions et perspectives

La biotechnologie industrielle permet la synthèse d'un large éventail de substances chimiques, essentiellement en utilisant des micro-organismes utiles et leurs enzymes. La déferlante récente de nouvelles applications donne à penser que, jusqu'à présent, seule la partie visible de l'iceberg a été explorée. En 1964, le microbiologiste Jackson Foster prophétisait déjà : « Never underestimate the power of the microbe » [*Ne sous-estimez jamais la puissance du microbe*]. Le temps lui aura donné raison.

Cette technologie était déjà bien implantée dans les domaines traditionnels de l'industrie alimentaire et des soins de santé. À présent, elle pénètre également l'industrie chimique, en particulier grâce à des applications dans la chimie fine, les produits chimiques en vrac, les polymères synthétiques, l'industrie pharmaceutique et le secteur énergétique. Le fait que ces procédés et produits se basent essentiellement sur des matières premières renouvelables d'origine agricole joue particulièrement en leur faveur dans le contexte actuel d'intérêt pour le développement durable.

Cette chimie verte mérite (ainsi que ses bioproduits) une attention plus soutenue de la part des scientifiques, des industriels et des décideurs politiques. La réussite d'une innovation biotechnologique, qu'il s'agisse d'un produit ou d'un procédé, ne dépend pas uniquement de la technologie et de la science, mais aussi de bon nombre de facteurs comme l'acceptation sociale, le climat innovant et le soutien des pouvoirs publics à travers une politique pertinente en matière de recherche et de développement.

Le CAPAS espère que ce rapport comportera un élément de révélation pour le lecteur et qu'il incitera les différents groupes cibles à passer à l'action de façon à stimuler le développement de ce secteur, qui présente un intérêt considérable tant sur le plan social qu'industriel.

8. Bibliographie

BACHMANN, R. (2002). Industrial Biotechnology – new value creation opportunities. McKinsey & Co. Étude.

CAMPBELL, C. (1998). The future of oil. Energy exploration and exploitation, 16, 125-152.

CICAD, V.G.; MATHIJS, E.; NEVENS, F.; REHEUL, D. (2003). Energiegewassen in de Vlaamse landbouwsector. Publicatie n° 1, steunpunt voor duurzame landbouw.

CHOTANI, G.; DODGE, T.; HSU, A.; KUMAR, M.; LADUCA, R.; TRIMBUR, D.; WEYLER, W.; SANFORD, K. (2000). The commercial production of chemicals using pathway engineering. Biochimica et Biophysica Acta, 1543, 434-455.

Commission AMPERE (2000). Rapport de la Commission pour l'Analyse des Modes de Production de l'Électricité et le Redéploiement des Énergies, en abrégé AMPERE, au Secrétaire d'État à l'énergie et au développement durable. Synthèse du Rapport de la Commission.

Commission Européenne

« Vers une vision stratégique des sciences du vivant et de la biotechnologie », communication COM (2001) 454 def.

« Sixième programme d'action pour l'environnement » de l'Union Européenne, communication COM (2001) 38.

« Sciences du vivant et de la biotechnologie : Une stratégie pour l'Europe », communication COM (2002) 27.

« La politique industrielle dans une Europe élargie » communication COM (2002) 714.

« Plan d'action de l'UE pour intensifier l'effort de recherche en Europe », IP/03/584

DALE, B.E. (2003). "Greening" the chemical industry : research and development priorities for biobased industrial products. Journal of Chemical Technology & Biotechnology, 78, 1093 – 1103.

DEMAIN, A.L. (2000). Small bugs, big business : the economic power of the microbe. Biotechnology Advances, 18, 499-514.

DE BAERE, L. (2000). Anaerobic digestion of solid waste: state-of-the-art. *Water Science & Technology*, 41(3), 283-290.

EGGERSDORFER, M.; MEYER, J. & ECKES, P. (1992). Use of renewable resources for non-food materials. *FEMS Microbiology Reviews*, 103 , 355-364.

FUKUDA, H.; KONDO, A.; NODA, H. (2001). Bio-diesel fuel production by transesterification of oils. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 92, 405-416.

Global energy perspectives (1995). Joint IIASA-WEC study. www.iiasa.ac.at

Groene Chemie en Bio-energie : een duurzame oplossing (2002). Compte rendu de la 51^e journée de l'enseignement post-universitaire (Post Universitaire Onderwijsdag (PUO)). Faculté des Sciences agronomiques et de Biologie appliquée, Universiteit Gent [*Université de Gand*].

IEA Bioenergy. www.ieabioenergy.com

HAMMES, F., KALOGO, Y. and VERSTRAETE, W. (2000). Anaerobic digestion technologies for closing the domestic water, carbon and nutrient cycles. *Water Science & Technology*, 41(3), 203-211.

LYND, L.R. (1996). Overview and evaluation of fuel ethanol from cellulosic biomass : technology, economics, the environment, and policy. *Annual Reviews in Energy and Environment*, 21, 406-465.

New biocatalysts : essential tools for a sustainable 21st century chemical industry (1999). Position paper Council for Chemical Research, USA.

OCDE. Les biotechnologies au service de la durabilité industrielle (2001). Rapport de l'OCDE, ISBN 92-64-19546-7

ODE. Organisatie voor Duurzame Energie in Vlaanderen. www.ode.be

- OKKERSE, H. & VAN BEKKUM, H. (1999). From fossil to green. *Green chemistry*, avril 1999, 107-114.
- PERSIDIS, A. (1998). Biotechnology in 1998 and beyond. *Nature Biotechnol.*, 16 , 1378-1379.
- RÖPER, H. (2002). Renewable Raw materials in Europe : Industrial Utilization of Starch and Sugar. *Starch / Stärke*, 54, 89-99.
- SHAPOURI, H.; DUFFIELD, J.A.; WANG, M. (2003). The energy balance of corn ethanol : an update. USDA report n° 814.
- VANDAMME, E.J. (1994). The search for novel microbial fine chemicals, agrochemicals and biopharmaceuticals. *Journal of Biotechnology*, 37, 89-108.
- VANDAMME, E.J. & SOETAERT, W. (1995). Biotechnical modification of carbohydrates : a review. *FEMS Microbiology Reviews*, 16, 163-186.
- VANDAMME, E.J. & SOETAERT, W. (2002). Bioflavours and fragrances via fermentation and biocatalysis. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 77, 1323-1332.
- WILKE, D. (1995). What should and what can biotechnology contribute to chemical bulk production? *FEMS Microbiology Reviews*, 16, 89-100.
- WILKE, D. (1999). Chemicals from biotechnology : will molecular plant genetics challenge the chemical and the fermentation industry. *Applied Microbiology & Biotechnology*, 52, 135-145.
- WUEBBLES, D.J. & JAIN, A.K. (2001). Concerns about climate change and the role of fossil fuel use. *Fuel processing technology*, 71, 99-119.

ANNEXE A

Exemples de produits basés sur la biotechnologie industrielle

A.1 - Les additifs et suppléments nutritionnels

Les acides aminés sont les constituants fondamentaux très importants des protéines et sont de plus en plus utilisés comme additifs alimentaires destinés à l'alimentation humaine et animale. S'il y a encore peu de temps, une partie limitée des aminoacides était produite par la biotechnologie industrielle, pratiquement tous les 20 amino-acides naturels sont à présent produits par la technologie de fermentation ou par voie enzymatique.

Ce secteur concerne assez souvent des productions de très grande taille. La production mondiale de L-amino-glutamine est d'un million de tonnes par an, ce qui en fait une des plus importantes productions par fermentation et comparable, en tonnage, à beaucoup de produits pétrochimiques. L'acide glutamique est utilisé sous forme de glutamate monosodique (MSG) comme exhausteur de goût dans beaucoup d'aliments. La L-lysine (350.000 t/an) est un autre acide aminé qui trouve son domaine d'application dans le secteur des aliments pour animaux.

Un autre acide aminé, la L-phénylalanine, intervient dans la synthèse de l'aspartame. L'aspartame est un édulcorant, 200 fois plus doux que le sucre, utilisé dans de nombreux produits (p.ex. dans les boissons non alcoolisées allégées). Cet acide aminé atteint une production mondiale d'environ 15.000 t/an (prix moyen sur le marché mondial de 35 Euro/kg). Son procédé initial de synthèse reposait complètement sur la synthèse chimique mais est actuellement fortement basé sur la biotechnologie industrielle. Les composants les plus importants de l'aspartame, les acides aminés L-phénylalanine et l'acide L-asparagine, sont produits respectivement par fermentation et biocatalyse. Ainsi, Holland Sweetener Company utilise la synthèse enzymatique pour réaliser une liaison entre les composants : les acides aminés phénylalanine et l'acide asparagine sont couplés spécifiquement à l'aide d'une enzyme bactérienne, la thermolysine. Quelques étapes chimiques supplémentaires permettent d'obtenir l'édulcorant, l'aspartame.

La L-Carnitine est un composant naturel, fonctionnel comme vitamine chez les animaux, et stimulant le métabolisme des lipides. La L-Cartinine était produite par le passé par une synthèse chimique, mais est actuellement obtenue par un procédé de fermentation partant de produits de base renouvelables. La L-Cartinine obtenue est très pure et trouve des

applications sur une échelle de plus en plus importante. Les hommes et animaux peuvent utiliser la L-Carnitine comme supplément nutritionnel pour stimuler le métabolisme des graisses (plus d'énergie, synthèse de graisses réduite et plus de croissance).

L'acide érythorbine ou acide iso-ascorbique est un anti-oxydant utilisé dans les aliments et produit par un procédé de fermentation à partir de glucose (Pfizer, Roquette). Le produit est analogue du point de vue chimique à la vitamine C, mais sans fonction de vitamine.

Le glucose est transformé pratiquement quantitativement en 2-keto-glucolique à l'aide de fermentation par des bactéries *Gluconobacter*, et ensuite cyclisé chimiquement jusqu'à l'acide érythorbine.

Les quelques exemples représentent à peine une partie d'une série qui devient de plus en plus longue, notamment parce que les additifs nutritionnels produits d'une façon biotechnologique ont une image plus positive que leurs confrères produits d'une façon chimique.

A.2 – Les bio-pesticides

Le marché mondial des bio-pesticides est actuellement de l'ordre de 130 millions d'euro. Ces produits sont également appelés « Biological Control Agents » (BCA). Ces bio-pesticides ne pèsent pas sur la culture, sont très spécifiques, ne laissent pas de résidus toxiques, sont complétement biodégradable et leurs coûts de développement sont très favorables vis-à-vis leurs confrères chimiques.

Les bioinsectides à base de bactéries, moisissures et virus sont connus et commercialisés depuis longtemps. Diverses bactéries de la famille de *Bacillus thuringiensis* produisent des δ -endotoxines, protéines très toxiques pour les insectes, mais totalement innocentes pour l'homme. Ces bactéries sont cultivées par des procédés de fermentation et sont ensuite utilisées comme bio-pesticide afin de tuer les insectes dans le domaine de l'agriculture et des forêts, dans le stockage des blés, etc. La biotechnologie verte a continué à travailler sur l'efficacité de ce principe, par incorporation du gène codant le δ -endotoxine bactériel dans diverses cultures de l'agriculture comme le maïs, le rendant ainsi résistant à l'attaque d'insectes.

Ainsi des préparations vivantes de moisissures, des virus d'insectes et même les nématodes sont utilisés comme insecticide sélectif, en rendant ces insectes malades jusqu'à la mort. Ces préparations sont cultivées par des procédés de fermentation et ensuite pulvérisées dans l'agriculture et l'horticulture.

Les bioherbicides sont aussi l'objet d'une préoccupation intense. Certaines mauvaises herbes peuvent être traitées de manière sélective et efficace par des moisissures

phytopathogènes bien définies : on les appelle mycoherbicides. Des traces de *Collectitrichum gleosporioides* (COLLEGO™) sont utilisées contre certaines maladies dans les cultures de riz et de soja ; *Phytophthora palmivora* (DEVINE™) et contre certaines maladies dans les cultures de citrus aux USA. Ces moisissures sont obtenues par fermentation. Après la mort des mauvaises herbes, les moisissures meurent aussi. Le Bialaphos (gluphosinate, un dérivé de phosphinotricine) est un produit de fermentation de Streptomycines, utilisé comme herbicide total. Ce produit a été découvert et développé au Japon (Meji Seika Co.). C'est un analogue d'un tri peptide, inhibant la synthétase de glutamine dans les plantes, avec la mort comme conséquence. Il trouve une application générale dans l'agriculture, mais aussi pour les voies ferrées, routes, places, ... La biotechnologie verte (de plantes) a utilisé cette connaissance pour développer des plantes transgéniques résistantes au gluphosinate.

C'est de cette façon que la biotechnologie industrielle intervient dans **la synthèse de pesticides classiques**.

Un exemple est la synthèse de l'acide S-chloropropionique, produit intermédiaire dans la synthèse d'herbicides de phénoxypropionate chirale (2.000 t/an). Ces herbicides chiraux sont devenus très importants récemment et très bien adaptés pour leur synthèse par la biotechnologie industrielle.

On part de l'acide propénoïque racémique, contenant aussi bien la forme R que la forme S, d'où seule la forme S conduit à un herbicide actif. A l'aide d'une enzyme spécifique de dehalogénase obtenue à partir des bactéries *Pseudomonas*, seule la forme R obtenue peut être séparée et recyclée. Un autre procédé biotechnologique part de glucose, transformé par fermentation en l'acide D-lactique, et ensuite chloré chimiquement pour obtenir l'acide S-chloropropionique.

Partant de ce produit intermédiaire, la synthèse continue afin d'obtenir un herbicide homo chiral, contenant seulement la forme active S. En comparaison avec le mélange d'herbicide classique (forme R et S), seulement la moitié de ce nouvel herbicide homo chiral est utilisée pour le pulvériser sur les champs et ceci avec la même efficacité.

A.3 - Les bio-colorants et arômes

Les colorants sont produits de manière croissante par la biotechnologie industrielle, surtout si ces colorants sont destinés à des applications nutritionnelles, pharmaceutiques ou cosmétiques. Dans pas mal de cas, ces produits sont fabriqués par des synthèses chimiques ou par la biotechnologie industrielle avec des coûts de production comparables. Les colorants produits par la biotechnologie industrielle ont l'avantage important de

marketing vu leur apparition sur le marché comme bio-colorants naturels, vu le refus du consommateur de produits synthétiques dans ses aliments.

Le β -carotène (ou provitamine A) est produit ou bien par synthèse organique, extraction des carottes ou bien par fermentation à l'aide de *Blakeslea trispora*. Les hydroxycaroténoïdes optico-actifs comme la zeaxanthine et l'astaxanthine trouvent leur importance dans la nutrition animale et humaine, avec des applications surtout dans le secteur de la poissonnerie et la nutrition animale.

Le pigment rose astaxanthine est, par exemple, ajouté à la nutrition du saumon afin d'obtenir la couleur rose de la chair du saumon. De façon naturelle, le saumon obtient ce pigment de sa nourriture naturelle.

Il n'y a pas tellement longtemps, l'astaxanthine était produite de manière synthétique, par un procédé de synthèse supportant sur une série d'étapes de bioconversion énantiosélective utilisant p. ex. *Bacillus* et moisissures. Plus récemment, un intérêt assez fort était observé pour la synthèse directe par fermentation de ce pigment à l'aide d'une levure rouge *Xanthophyllomyces rhodozyma*. En effet on critiquait le fait que la variante synthétique était différente de l'astaxanthine naturelle.

Un pigment bleu pour nourriture – phycocyanine- est produit au Japon avec la cyanobactérie *Spirulina* sp., ainsi que le pigment orange-rouge pour boisson/nutrition- monascine- est produit avec le *Monascus purpureus* par un procédé de fermentation.

Les arômes peuvent être produits par fermentation ou par technologie enzymatique. La société allemande BASF a récemment démarré la synthèse microbienne du 4-decalacton, un arôme de pêche. Il est basé sur un procédé de fermentation avec la levure *Yarrowia lipolytica*, d'où à partir de l'huile de ricin, riche en acide ricinoléine, l'acide 12-OH-19 octadécène est produit et ensuite métabolisé en 4-decalacton, le produit recherché. Unilever en Angleterre produit à l'aide de la levure de boulanger comme biocatalyseur l'arôme du beurre, R-d-dodecanolide, partant de l'acide 5-ketododecane. L'acide butyrique et ses éthylesters sont déjà obtenus depuis longtemps par fermentation et sont appliqués comme arôme de fromage, arôme de fruits, ...

A.4. - Les solvants

Le solvant « vert » le plus important actuellement est l'éthanol, obtenu par fermentation partant de sucre ou glucose. L'éthanol est un solvant utilisé à grande échelle dans l'industrie chimique vu sa disponibilité, sa pureté, son faible prix, son caractère non toxique et parfaitement biodégradable. La production mondiale était en 2002 de

26 millions de tonnes, dont 63 % sont utilisés comme biocarburant, 12% pour la nutrition humaine et 25 % pour l'industrie chimique. La partie la plus importante est produite par la voie biotechnologique, contre à peine 9 % encore obtenus par voie pétrochimique (voir aussi 4.5.2).

Un nouveau venu assez fort sur ce plan est le solvant ethyllactate. L'éthyllactate est produit en partant de l'éthanol et de l'acide lactique, tous les deux obtenus par les procédés de fermentation de glucose ou de sucre. Ce produit est également non toxique, bon marché et contient d'autres caractéristiques de solvation que l'éthanol. Un grand avenir est promis à ce nouveau solvant mais la disponibilité actuelle est un facteur limitant vu son apparition récente sur le marché.

A.5 – Les plastiques et les bio-plastiques

Une série de plastiques a été récemment commercialisée, où la biotechnologie industrielle joue un rôle déterminant dans sa synthèse. Le procédé de production est constitué d'une synergie intelligente entre la polymérisation classique, par voie chimique, et la biotechnologie industrielle.

La biotechnologie industrielle intervient principalement dans la synthèse des monomères, produits basiques pour les polymères. Les monomères sont ensuite convertis en polymères par un procédé de polymérisation classique.

Mitsubishi Rayon produit au Japon l'acrylamide en partant d'acrylonitrile à l'aide de l'enzyme bactérienne immobilisée nitrile hydratase. L'acrylamide est ensuite polymérisé en plastique classique, la polyacrylamide. Ce procédé était une des premières applications industrielles à grande échelle d'enzymes dans le secteur chimique et remplace le procédé de production classique à l'aide de l'acide sulfurique et de catalyseurs inorganiques. Le procédé enzymatique a des avantages significatifs vis-à-vis de l'alternative chimique comme indiqué dans le tableau suivant. L'efficacité de la conversion enzymatique donne moins de résidus, des rendements plus élevés et une consommation nettement moindre avec comme conséquence une production de CO₂ plus faible.

Production d'acrylamide

	Procédé chimique	Bioprocess
Température de réaction	70°C	0-15°C
Rendement de réaction en une étape	70-80%	100%
Concentration d'acrylamide	30%	48-50%
Concentration du produit	nécessaire	Pas nécessaire
Demande d'énergie (vapeur et électricité en MJ/kg d'acrylamide)	1.9	0.4
Production de CO ₂ en kg CO ₂ /kg d'acrylamide	1.5	0.3

La raison la plus importante pour utiliser la voie biotechnologique était la meilleure qualité du produit. Il n'y a pas de polymérisation non voulue par la voie biotechnologique, ce qui conduit à une polyacrylamide plus pure et polymérisable pour des applications à plus haute valeur technologique. Aujourd'hui, on produit environ 100.000 tonnes d'acrylamide par cette voie au Japon et dans d'autres pays. Dans ce cas, une matière plastique normalement produite au départ de ressources pétrochimiques l'est à l'aide de la biotechnologie industrielle ; les ressources renouvelables n'interviennent pas ici. Sorona™3GT est une nouvelle fibre en polyester fabriquée par DuPont. Un des monomères pour la production de ce polymère est le 1,3 propane diol, obtenu par fermentation à partir de ressources renouvelables; dans ce cas, le glucose vient du maïs. Dans le cadre d'une collaboration entre Genencor et DuPont, 4 gènes étrangers venant d'autres micro-organismes étaient implantés dans un E. coli. Le produit recombinant, comme résultat de cette transformation, 1,3 propane diol est impossible à produire de façon naturelle à partir de maïs. Cette technologie est un bel exemple d'engineering métabolique. Le monomère est classiquement produit par une synthèse chimique partant de ressources pétrochimiques comme l'oxyde d'éthylène ou l'acroléine, mais la voie biotechnologique donne la possibilité d'obtenir ce produit à partir de ressources renouvelables et avec des coûts comparables. Le nouveau polymère Sorona™ est surtout utilisé comme fibre synthétique dans l'industrie de textile et n'est pas biodégradable avec un comportement comme polymère classique.

Le Natureworks™ bio-plastic (PLA, Poly acide lactique) est produit aux Etats-Unis depuis 2002 par la société Cargill-Dow à partir de glucose venant du maïs (140.000 t/an). Le glucose est d'abord transformé en acide lactique par fermentation, suivi d'une polymérisation au poly(acide lactique) ou PLA. Le polymère a des propriétés tout à fait comparables à celles des polymères classiques comme le polyéthylène ou le polypropylène et est utilisé dans l'industrie du textile et dans l'emballage. Le polymère est complètement biodégradable (compostage) ; le matériel d'emballage, les gobelets plastiques, ... peuvent être ajoutés dans le compost (résidu jardin-légumes-fruits). L'image idéale est approchée dans ce cas : un polymère complètement biodégradable est produit à partir de ressources renouvelables par la biotechnologie industrielle avec des qualités techniques égales aux polymères classiques.

La biotechnologie industrielle entre aussi dans le domaine de la production de matières plastiques, partant d'une seule étape dans la synthèse classique de polymères jusqu'à la production de polymères biodégradables à partir de ressources renouvelables. Dans tous les cas, il s'agit d'une production industrielle à grande échelle de matières plastiques, un secteur où les ressources renouvelables en combinaison avec la biotechnologie industrielle sont tout à fait compétitives. Le tableau suivant donne un aperçu des caractéristiques des procédés mentionnés :

Matière plastique	Ressource	Utilisation de ressources renouvelables	Monomère	Biodégradabilité	Technologie utilisée
Polyacrylamide	Acrylonitrile	Non	Acrylamide	Non	Enzymatique
Sorona™ polyester	Glucose	Oui	1,3 propane diol	Non	Fermentation
Natureworks™ PLA	Glucose	Oui	Acide lactique	Oui	Fermentation

A.6 – Les vitamines

Les vitamines sont des produits de la chimie fine très importants et fabriqués en des quantités relativement importantes. Si un certain nombre de vitamines sont seulement et uniquement fabriquées par la voie biotechnologique, comme par exemple la vitamine B12, un composé extrêmement compliqué, d'autres vitamines peuvent être obtenues par la voie chimique, la voie biotechnologique et assez souvent par une combinaison de ce deux voies.

Un bel exemple est constitué par la synthèse de la vitamine B₂ (riboflavine, 4000 t/an). Le procédé classique comportait la synthèse de la D-ribose par fermentation à l'aide de bactéries *Bacillus*, suivie d'une séquence de réactions chimiques afin d'obtenir la riboflavine. Ceci était une synthèse combinée chimique biotechnologique comportant 8 étapes. Cette synthèse combinée était récemment remplacée par une synthèse complètement biotechnologique de la riboflavine en une seule étape de fermentation à l'aide de bactéries, levures ou moisissures (respectivement par Roche, ADM et BASF). La productivité de ces procédés de fermentation est tellement élevée que le produit recristallise durant la fermentation même. Les coûts de production de ce nouveau procédé biotechnologique sont 40% plus bas que ceux du procédé classique.

Un autre exemple est la synthèse de la vitamine C (acide ascorbique), classiquement obtenue par la synthèse Reichstein-Grüssner, un procédé de synthèse partant de glucose et comportant une étape de fermentation et 5 étapes chimiques. Un nouveau procédé a été récemment utilisé par la société Cerestar/BASF. Dans ce nouveau procédé, le procédé de fermentation remplace une série d'étapes chimiques. Le nouveau procédé de synthèse comporte une étape de fermentation et deux étapes chimiques relativement simples (via 2-keto-L-acide gulonique). Les recherches continuent pour obtenir la vitamine C par la voie complètement biotechnologique, transformant le glucose en une seule étape de fermentation.

A.7 - Les produits de chimie fine et pharmaceutiques

Le secteur de la chimie fine et pharmaceutique constitue déjà aujourd'hui un secteur avec le degré de pénétration le plus élevé (15%) de la biotechnologie industrielle, même si le domaine d'application est encore en plein développement technologique.

Les antibiotiques et leurs produits intermédiaires sont les produits de la chimie fine les plus importants avec un marché mondial d'environ 20 milliards d'euro. Ils sont pratiquement exclusivement produits à l'aide de micro-organismes spécialement sélectionnés. La complexité structurelle de la plupart des antibiotiques est tellement grande que la synthèse chimique ne constitue jamais une alternative sérieuse pour la fabrication d'antibiotiques. Dans le cas de ce qu'on appelle les antibiotiques semi-synthétiques, le produit de base est obtenu par fermentation modifiée de façon chimique afin d'obtenir un nouveau dérivé antibiotique de meilleures performances. Aujourd'hui, de nombreuses modifications chimiques sont remplacées par des méthodes biotechnologiques, avec de très bons résultats économiques et écologiques.

Un autre exemple du secteur pharmaceutique consiste dans la synthèse de CaptoprilTM, un ACE-inhibiteur contre une pression de sang trop élevée. CaptoprilTM est constitué de deux produits de base, D- β -hydroxy-acide butyrique et L-proline, tous les deux synthétisés par fermentation avec respectivement la levure *Candida rugosa* et la bactérie *Corynebacterium* sp. Les deux produits de base sont ensuite couplés de façon chimique, donnant directement le CaptoprilTM.

La société Lonza a développé une voie biotechnologique transformant la 3-cyanopyridine en nicotinamide (niacine ou vitamine B3), acide nicotique et l'acide 6-hydroxynicotique. Ces produits intermédiaires de nombreuses synthèses chimiques sont aujourd'hui obtenus par la biotechnologie industrielle. Les transformations se font par hydrolyse enzymatique avec nitrile hydratase des bactéries *Rhodococcus* ou bien bioconversion avec des cellules de bactéries vivantes. Ces réactions sont très spécifiques et les conversions presque qualitatives.

Dans le secteur des transformations enzymatiques, la société Novozymes a commercialisé une lipase très thermostable de la levure *Candida* (*Pseudozyma*) *antarctica* (Novozyme 435), produit très efficace pour les estérifications très spécifiques dans des solvants organiques. Cet enzyme trouve un domaine d'application très large dans divers secteurs de la chimie.

ANNEXE B

Bio-fuels : technologie, applications et marché

B1 – Le bio-éthanol

Le bio-éthanol (alcool ou alcool éthylique) est produit par fermentation des sucres, généralement à l'aide de levures. Ces sucres peuvent être fournis par une multitude de matières premières telles que la betterave sucrière, la canne à sucre, le blé, le maïs ou les déchets organiques. En Europe, l'alcool est principalement produit à partir des betteraves sucrières ou du blé, qui fournissent un substrat facile à fermenter. La recherche se poursuit sur la production d'alcool à partir de substrats disponibles mais beaucoup plus difficiles à fermenter, tels que les résidus organiques provenant de l'agro-industrie et des ménages (déchets de fruits et légumes, ainsi que déchets verts).

D'une part, l'ingénierie génétique permet de modifier des micro-organismes pour les rendre capables de transformer des substrats plus complexes comme les pentoses (C5) et la cellulose en alcool. Ces "super-micro-organismes" pourraient être utilisés pour convertir en éthanol des substrats complexes comme la bagasse, les déchets de légumes, le papier etc. Les recherches sur cette technologie sont particulièrement actives aux USA. Tout ce secteur est fortement stimulé par les autorités, ce qui a déjà permis la réalisation de différentes installations pilotes et même industrielles.

D'autre part, beaucoup d'argent est investi dans la recherche biotechnologique pour améliorer des cellulases et permettre leur production à moindre coût. Ces "supercellulases" servent à hydrolyser la cellulose en glucose facilement fermentescible. Après la fermentation, l'alcool est généralement récupéré par distillation du moût de fermentation, ce qui élimine les impuretés. L'alcool peut être utilisé sous différentes formes comme carburant pour les moteurs, soit pur, soit en mélange à l'essence. Pour être utilisé en mélange à l'essence, l'alcool doit être préalablement déshydraté. L'alcool déshydraté peut aussi être transformé en éthyl tertio-butyl éther (ETBE) par réaction avec l'isobutylène, une substance intermédiaire en pétrochimie. L'ETBE peut ensuite être mélangé à l'essence. L'alcool peut aussi être ajouté directement à l'essence normale. L'apport d'éthanol est généralement de 5 %. Dans la pratique européenne actuelle, l'éthanol est surtout ajouté sous forme d'ETBE. Aux États-Unis et au Brésil, l'éthanol est le plus souvent ajouté directement à l'essence et à de plus hautes concentrations. Si la proportion d'éthanol dans le mélange reste inférieure à 15%, aucune adaptation des moteurs n'est requise. L'addition de bio-éthanol ou d'ETBE augmente la teneur en

oxygène du carburant et améliore sa combustion. L'ETBE est souvent ajouté comme remplaçant du plomb dans l'essence, ce qui présente aussi des avantages écologiques. Une partie considérable de la population européenne utilise donc déjà un (petit) pourcentage de biocarburant sans s'en rendre compte !

Un million six cent mille tonnes d'éthanol ont été produites dans la communauté européenne en 2002, dont 225.000 t utilisées comme biocarburant essentiellement en Espagne, France et Suède. L'Europe se distingue par sa très faible utilisation du bio-éthanol, comparativement aux États-Unis et au Brésil qui ont produit respectivement 5,7 et 8,7 millions de tonnes d'éthanol carburant (voir Tableau). La production mondiale est de 26 millions de tonnes d'éthanol, dont 63% sont utilisés comme biocarburant. L'Europe produit donc seulement 6% de l'éthanol mondial.

Tableau : Production et utilisation du bio-éthanol en 2002

Pays	Principale matière première	Production totale (million t/an)	Utilisation comme biocarburant (million t/an)	Utilisation comme biocarburant par rapport à la production totale
Brésil	canne à sucre	9,5	8,7	92 %
USA	maïs	6,4	5,7	90 %
Europe	betterave sucrière et blé	1,6	0,2	14 %
Monde	divers	26	16,4	63 %

B.2. – Le bio-diesel

Le bio-diesel est produit à partir de graisses et d'huiles végétales. En Europe, mis à part les graisses et huiles de récupération (par ex. les huiles de friture usagées), la plupart du bio-diesel est produit à partir d'huile de colza. L'huile de colza est transformée par transestérification avec du méthanol, qui conduit à la formation de bio-diesel et de glycérol. Le bio-diesel correspond aux esters méthyliques des acides gras en C16 - C18 de l'huile de colza. Le glycérol produit est dirigé vers d'autres applications. La technologie de transestérification se base sur un processus chimique simple (catalyse alcaline) et ne requiert pas de biotechnologie.

Le bio-diesel ainsi obtenu peut être mélangé sans problème dans le diesel normal. On l'utilise généralement en mélange à 5 %. En France, on utilise aussi un mélange contenant 30% de bio-diesel (mélange appelé diester). En Allemagne et en Autriche, on utilise aussi le bio-diesel pur. L'utilisation de bio-diesel ne requiert aucune adaptation des moteurs. Au contraire, le bio-diesel est apprécié en raison de son pouvoir lubrifiant. Le seul problème pouvant se manifester lors de l'utilisation de bio-diesel pur en hiver est sa cristallisation à basse température. La production de bio-diesel est en forte croissance et a dépassé en 2002 le cap de 1 million de tonnes, produites principalement en Allemagne, en France et en Italie.

B.3. Le biogaz

Le biogaz est le gaz produit par fermentation méthanigène (digestion anaérobie) de biomasse. La digestion anaérobie repose sur l'activité de communautés microbiennes composées de nombreuses espèces coopérant entre elles pour transformer des matières organiques complexes en dioxyde de carbone et en méthane. Ces molécules se séparent spontanément du liquide et peuvent être aisément récupérées sous forme de biogaz. Le biogaz contient normalement environ 60-70% de méthane et a un contenu énergétique d'environ 20-25 MJ/m³. Il peut être brûlé ou utilisé pour alimenter des moteurs pour la production d'électricité et de chaleur. On peut typiquement retirer 1 kWh d'électricité et 2 kWh d'énergie thermique utile à partir du biogaz produit par la fermentation de 1 kg (matière sèche) de matière organique fermentescible (sucres, résidus végétaux, ...). Il faut souligner que la digestion anaérobie des résidus organiques est un processus particulièrement efficace. Elle permet de récupérer une bonne partie du contenu énergétique de ces résidus, y compris des résidus très humides (lisiers, boues d'épuration) qui ne peuvent être valorisés par combustion (si ce n'est après des prétraitements très énergivores qui dégradent le bilan énergétique). La digestion anaérobie laisse un résidu qui contient tous les éléments minéraux et un peu de matière organique résiduelle récalcitrante (par ex. la lignine) sous forme de matières humiques. Ces substances minérales et organiques sont d'une grande valeur pour maintenir la fertilité des sols agricoles. Les matières minérales peuvent se substituer à des fertilisants dont l'importation ou la synthèse chimique (fertilisants azotés) sont énergivores et contribuent tant à épuiser des ressources fossiles qu'à polluer l'environnement (eutrophisation, importation de métaux lourds). Le concept de la production de biogaz à partir de biomasse est déjà bien établi techniquement et exploité dans la pratique (plus de 2000 installations en Allemagne). Un hectare de maïs peut produire 48000 kWh de

biogaz, qui peut être converti en 14500 kWh d'électricité et 24000 kWh de chaleur utile. Actuellement, cette énergie ne peut assurer qu'une marge brute d'environ 400 euros par ha pour l'exploitant, alors que d'autres cultures peuvent lui assurer un minimum de presque 1.000 euros/ha. Etant donné que la digestion anaérobie est déjà techniquement au point et cadre parfaitement avec le concept d'agriculture durable (entre autres par le recyclage des éléments minéraux et des matières humiques lentement minéralisables vers le sol), son développement effectif dans la pratique n'attend qu'une revalorisation du prix de l'énergie et d'une agriculture qui assure la bonne gestion des sols et des paysages. Les conditions économiques sont beaucoup plus favorables pour la conversion des déchets organiques en biogaz. Cette technologie est donc beaucoup plus largement utilisée pour le traitement des effluents (essentiellement dans l'industrie agro-alimentaire), de boues d'épuration, de déchets organiques ménagers triés à la source et de déchets verts. Des installations en fonctionnement et en projet sont présentes en Belgique. Après la "méthanisation", les résidus aqueux sont ensuite traités par ex. . par purification « aérobie ».

Dans le tableau ci-après dans le cas des résidus des sucreries (bagasse), on peut constater que la conversion totale en électricité peut se réaliser de manière économique. En effet, avec un prix d'électricité de 100 €/MWh (avec certificat d'énergie « verte »), la valeur de cette source électrique valorise à environ deux à trois fois le prix de la matière utilisée.

TABLEAU : Concept de la production d'électricité par conversion de la biomasse en biogaz (avec 1 kg de sucre équivalent = 1kWh produit)

Matière de départ		Efficacité (%) Conversion « gaz »	Electricité MWh/t (sec.)	Quantité théorique €/t (sec.)	
Type	Prix Marché €/t (sec.)			Minimum @ 25 €/MWh	Maximum (+ certificat vert) @ 100 €/MWh
Sucre	180	100	1	25	100
Maïs	80	80	0,8	20	80
Bagasse	20	60	0,6	15	60
Paille	20	50	0,5	12,5	50

L'hydrogène est un autre gaz qui peut être produit par fermentation. L'hydrogène est actuellement considéré comme un vecteur énergétique ayant des caractéristiques favorables du point de vue environnemental. L'hydrogène peut être obtenu par divers processus de fermentation microbienne à partir de matière organique. Tout comme pour la fermentation méthanigène, l'hydrogène gazeux se sépare spontanément du liquide et il n'est pas nécessaire de faire appel à des procédés de séparation coûteux. Toutefois, seulement 30% du contenu énergétique de la biomasse de départ peut être récupéré sous forme d'hydrogène dans la fermentation normale basée sur des micro-organismes organotrophes. La fraction énergétique résiduelle est contenue dans des acides gras et nécessite le concours de bactéries phototrophes et d'énergie lumineuse pour être extraite. Ces approches sont déjà en développement depuis plusieurs années, mais n'offrent pas encore de perspective décisive. En effet, 1 kg de glucide fournit au maximum 1.2 m³ d'hydrogène gazeux et, au prix de l'hydrogène sur le marché actuel, cela revient à une perte de valeur par rapport à la matière première. Bien que le contexte macro- et micro-économique actuel soit beaucoup plus favorable à la production d'hydrogène à partir de ressources fossiles plutôt qu'à partir de produits agricoles, la production d'hydrogène par fermentation est techniquement tout à fait réalisable. Il faut cependant mentionner que la synthèse d'hydrogène à partir de déchets n'est pas la voie la plus aisée, le procédé reposant sur l'inoculation de micro-organismes définis et sur l'utilisation de matières premières bien définies également.