

Biocarburants pour le transport : que peuvent apporter les biotechnologies dans leur production économique et écologique ?

Article général proposé par Laurent SOHIER, Biotechnologue, Docteur d'Etat ès Sciences en écologie et biochimie microbienne. Consultant en environnement et développement durable.

Courriel : laurent.sohier@club-internet.fr

Introduction

Dans les énergies tirées de la biomasse, la combustion du bois et de déchets organiques secs pour des usages traditionnels est dominante avec 45 EJ (10^{18} Joules) d'énergie primaire consommés par an pour 1,10 Gt de carbone biomasse brûlés. Les centrales thermiques à bois ou déchets agricoles ainsi que les incinérateurs d'ordures ménagères représentent en 2007, 26 Mt de carbone organique (biomasse) brûlés et 1 EJ d'énergie produite exclusivement distribués en chaleur ou électricité.

Connus depuis longtemps mais encore peu utilisés car plus chers à produire que les carburants issus du pétrole, les biocarburants de première génération ou agrocarburants sont tirés de matières premières alimentaires comme le sucre, l'amidon (fermentés en éthanol) ou des huiles végétales (biodiesels). Ils représentaient en 2007 une production de 12 Mt de carbone pour 0,5 EJ d'énergie primaire produite. Ceci grâce à des subventions massives dans les pays développés sur les énergies renouvelables et au développement de cultures comme la canne à sucre ou le palmier à huile dans les pays en voie de développement intertropicaux.

Outre les problèmes posés par l'augmentation des prix agricoles, la déforestation primaire ainsi que l'utilisation d'eau douce et de terres fertiles à des fins non alimentaires, les agrocarburants apparaissent de plus en plus comme une étape non viable sur les plans économiques et écologiques. Les agrocarburants ont bénéficié du fait que les technologies de culture, d'extraction et de transformation des matières premières étaient relativement bien maîtrisées et ne nécessitaient pas d'investissements en recherche et développement conséquents. L'éthanol issu d'amidon de céréales utilise déjà des produits de biotechnologie classique comme des amylases (enzymes coupant l'amidon en sucres) dont le prix est élevé ce qui explique les subventions élevées pour les producteurs américains et européens d'éthanol à partir de céréales.

Aussi bien pour la combustion traditionnelle de biomasse dont les rendements énergétiques sont faibles que pour les agrocarburants dont les rendements énergétiques à l'hectare cultivé sont faibles (les agrocarburants produits sur un hectare en un an permettent à un véhicule standard de rouler entre 20 000 et 50 000 km) avec des prix de matières premières élevés, force est de constater que les énergies tirées de la biomasse et, en particulier, les biocarburants pour le transport voient leur avenir conditionné par l'apparition de nouvelles approches technologiques et stratégiques de valorisation. Les nouveaux procédés devront être capables de

transformer des biomasses non alimentaires en carburants liquides ou gazeux et être exploitables à des échelles telles que leur coût devienne compétitif par rapport à ceux issus du pétrole qui bénéficient encore d'échelles de production énormes. En clair, même si le carbone de biomasse non alimentaire est moins cher que le carbone du pétrole, il faudra des usines de transformation et des procédés industriels capables de traiter des millions de tonnes de biomasse par an, comme le font les grandes raffineries de pétrole, pour que les biocarburants deviennent compétitifs.

Les biotechnologies classiques utilisent des organismes vivants pour produire des molécules naturelles à haute valeur ajoutée comme des antibiotiques ou des enzymes. Ces molécules sont extraites soit d'une culture de microorganismes sélectionnés ou modifiés, réalisée en bioréacteur dans un milieu stérile aqueux, soit de la biomasse d'organismes végétaux hôtes, modifiés génétiquement, qui vont utiliser leur machinerie photosynthétique pour produire une protéine codée par un gène transféré. Les biotechnologies sont en général dédiées aux productions à petite échelle et très haute valeur ajoutée de protéines. Ceci vient de la difficulté à cultiver un microorganisme seul en milieu stérile dans plusieurs m³ et des coûts d'extraction/purification élevés de la molécule produite dans un milieu aqueux ou une biomasse microbienne ou végétale. Le coût de la molécule produite intègre le coût des substrats, l'amortissement des équipements de culture, l'amortissement des frais de sélection ou modification de la souche ou du végétal utilisé, les coûts d'exploitation des équipements de culture, les coûts de séparation, extraction et purification de la molécule après récolte. Les coûts de production pour la molécule sont dans des fourchettes qui vont de 1 à 1000 € le gramme voire plus. Il paraît difficile d'imaginer une valorisation par des co-produits coûtant 10 000 à 10 000 000 de fois moins chers sur des productions forcément limitées en quantités.

Pour les biocarburants du futur dits de 2^{ème} et 3^{ème} génération, les biotechnologies ont certainement un rôle primordial à jouer dans la transformation de biomasses non alimentaires en carburants ou la production de biomasses photosynthétiques n'utilisant pas de terres fertiles et peu d'eau douce. Les biotechnologies devront d'abord évoluer pour passer à de plus grandes échelles de production et atteindre des coûts de mise en œuvre et de production compatibles avec ceux d'un carburant pour le transport. Pour changer d'échelle, les biotechnologies écosystémiques, qui utilisent les capacités de dégradation et de production de biomasse de microflore diversifiées présentes dans les écosystèmes, semblent les mieux placées pour relever ce défi.

Biotechnologies et biocarburants de 2^{ème} génération.

Les biocarburants de 2^{ème} génération sont issus de la transformation de cellulose abondante dans le bois et les déchets agricoles ou de la transformation de déchets organiques agricoles (lisiers, fumiers) et domestiques (ordures ménagères, boues d'épuration) en biocarburants primaires comme l'éthanol, le méthane (CH₄) ou l'hydrogène (H₂). Le CO₂ renouvelable obtenu lors de ces transformations pouvant être utilisé avec l'hydrogène pour synthétiser des carburants légers (CH₄, méthanol, diméthylether) ou lourds (syndiesels) par voie chimique.

Pour ces biocarburants de 2^{ème} génération trois voies majeures faisant appel à des degrés divers aux biotechnologies font l'objet de recherches ou de développements :

Biogaz.

La méthanisation est une voie biotechnologique écosystémique. Des matières organiques humides sont transformées en méthane par l'action d'une flore bactérienne anaérobie méthanogène diversifiée. La méthanisation se produit naturellement dans les milieux sédimentaires anaérobies riches en matières organiques détritiques. La méthanisation dans les milieux naturels peut être considérée comme un service écosystémique contribuant au recyclage des matières organiques.

Bien maîtrisée aujourd'hui, la production de biogaz peut se pratiquer à grande échelle car elle ne nécessite ni milieu stérile, ni souche améliorée. Son développement à grande échelle est cependant limité par les quantités de matières organiques disponibles dans un rayon d'approvisionnement suffisamment restreint pour que l'énergie du transport des matières premières reste faible par rapport aux quantités d'énergie produites par l'unité de transformation. Les coûts de production sont relativement faibles car intégrés dans le traitement des déchets. La collecte et le tri des matières organiques représentent certainement les étapes les plus pénalisantes mais elle sont nécessaires au traitement des déchets. Par rapport à d'autres techniques de traitement de déchets, les installations nécessaires ne réclament pas d'investissements disproportionnés. Le mélange de gaz obtenu par méthanisation (CH_4 , CO_2 , H_2S ,...) peut être utilisé directement pour la production de chaleur ou d'électricité ou après épuration du CH_4 comme carburant transport.

Certaines collectivités locales ont choisi de méthaniser les déchets organiques ménagers triés et produisent assez de méthane pour alimenter les camions de ramassage des ordures. En Allemagne de nombreuses stations d'épuration se sont dotées d'une installation de méthanisation des boues, ce qui leur permet d'économiser des énergies fossiles pour le chauffage et l'électricité.

Dans des zones à forte production de déchets organiques domestiques ou agricoles comme les zones touristiques, les zones industrielles agro-alimentaires ou d'élevage, la méthanisation à grande échelle permettrait de traiter les déchets et d'éviter le rejet naturel de gaz à effet de serre à fort pouvoir de réchauffement global comme le méthane. Transformé en CO_2 après combustion, le méthane renouvelable remplacerait également le gaz naturel fossile liquéfié (GNL) pour des applications en transport ou domestiques.

Syngaz et syndiesels.

La voie physico-chimique consiste à traiter de la biomasse sèche thermiquement pour obtenir des huiles (pyrolyse) et des mélanges de gaz (gazéification thermique) ou de la biomasse humide dans de l'eau en conditions proches du critique (gazéification hydrothermale). Les produits liquides étant ensuite raffinés en substituts du diesel et les produits gazeux (CH_4 , H_2 , CO_2 ,) traités chimiquement (réactions de Sabatier et de Fischer-Tropsch) pour donner des substituts d'essence (CH_4 , méthanol, DME) ou des diesels synthétiques.

La gazéification thermique profite des techniques anciennes développées pour la gazéification du charbon (usines à gaz et gazogène) et du pétrole. L'utilisation de biomasse pose cependant des problèmes importants d'impuretés dans les produits dus à la présence des autres constituants principaux de la matière vivante (N, O, P,

S). Ces procédés, d'autre part, utilisent pratiquement 5 fois plus d'énergie qu'ils n'en produisent et il faut actuellement brûler 5 tonnes de bois pour récupérer l'énergie en biocarburant correspondant à une tonne de bois. Sans compter l'énergie du transport pour l'approvisionnement en bois d'une grosse unité. Des recherches sont en cours pour utiliser de l'énergie nucléaire pour porter la biomasse à haute température et produire des biocarburants dont le carbone viendrait de la biomasse et serait donc renouvelable mais dont le cycle de vie énergétique serait caractérisé par une consommation 4 fois plus élevée d'énergie fossile.

Seule la gazéification hydrothermale envisage des étapes biotechnologiques. En effet, des recherches sont menées pour préparer la biomasse par voie enzymatique avant de la soumettre à l'eau en conditions critiques pour faciliter sa dégradation en CH_4 , H_2 et CO_2 . Comme on le verra ci-dessous pour l'éthanol cellulosique, la production d'enzymes de type cellulases n'est pas encore à une échelle suffisante pour rentabiliser ce genre d'opération. La gazéification hydrothermale présente le gros avantage d'être réalisée en milieu humide avec de la biomasse humide. L'eau étant un constituant majeur de la matière vivante, on comprend que de telles procédés physico-chimiques humides associés à des procédés biotechnologiques humides soient mieux placés que la gazéification thermique de biomasse sèche pour atteindre des coûts de biocarburants compétitifs.

Ethanol cellulosique.

L'éthanol cellulosique est obtenu à partir de cellulose issue de bois ou de déchets agricoles (pailles, rafles, cosses) traités par des enzymes pour les transformer en sucres qui seront fermentés en éthanol. Bien maîtrisée à petite échelle en bioréacteur stérile, la production d'enzymes comme les cellulases par des champignons filamenteux qui dégradent la cellulose en sucres doit passer à une échelle plus économique. Les enzymes produits en milieu stérile à partir de souches sélectionnées étant beaucoup trop chers pour rentabiliser un procédé de production de sucres fermentescibles à partir de cellulose. De plus, le bois contient de la lignine qu'il faut dégrader et séparer de la cellulose avant de la traiter.

Pour faire baisser les coûts de production des enzymes, deux logiques s'affrontent :

- Une logique dite de biologie moléculaire qui part du principe qu'en améliorant génétiquement les souches de microorganismes producteurs d'enzymes ou qu'en transférant des gènes codant pour ces enzymes dans des plantes largement cultivées comme les céréales, il sera possible de récupérer des enzymes par extraction et purification et de valoriser les résidus d'extraction en alimentation animale ou comme cellulose pour la fabrication d'éthanol biocarburant. Le co-produit valorisé baisserait d'autant le prix de l'enzyme. On voit mal cependant comment des résidus d'extraction de céréales destinés au bétail ou aux biocarburants, et donc à très faible valeur ajoutée, pourrait compenser le prix de l'extraction réalisée sur des tonnes de biomasse (investissement, transport et main d'œuvre) et censée récupérer quelques grammes d'enzymes qui ne serviront ensuite que de catalyseur dans la dégradation de la cellulose en sucre.
- L'autre logique est celle qui prévaut dans la méthanisation, c'est-à-dire l'emploi de microflore naturelles diversifiées productrices naturelles

d'enzymes pour attaquer des matières premières ligno-cellulosiques en vrac et récupérer un jus riche en sucres fermentescibles, voire en alcool, en associant des levures aux champignons producteurs de cellulases. L'idée est de recréer, de façon maîtrisée et à grande échelle, ce qui se produit dans les sols forestiers. Des composteurs étagés dans lesquels on ferait circuler de l'eau qui se chargerait de sucres et d'alcools au passage. L'Industrie papetière utilise déjà de tels procédés pour traiter le bois destiné à la fabrication des pâtes à papiers. Ce type de procédé nécessiterait peu d'investissement et de main d'œuvre. Le coût dépendrait essentiellement de l'énergie de distillation de l'alcool dans l'eau. Là, les projets pilotes ont déjà réglé le problème car, comme pour les papetiers, le procédé permet de récupérer des résidus de bois ou liqueurs noires utilisables comme carburants dans des chaudières.

On estime que la photosynthèse produit chaque année sur Terre près de 100 Gt de carbone sous forme de biomasse et que 80% de cette biomasse est de la cellulose. Les biocarburants de 2^{ème} génération veulent transformer une partie de cette cellulose abondante et non comestible en sucres par voie biotechnologique ou en molécules de base plus petite par voie physico-chimique. Il est d'ores et déjà évident que la voie biotechnologique de production de biocarburants consommera beaucoup moins d'énergie fossile ou renouvelable que les voies physico-chimiques qui nécessitent des températures élevées pour la dégradation en molécules simples de la biomasse suivies de purifications et de synthèses. Seule la production d'hydrogène semble intéressante avec la gazéification, les voies biotechnologiques de production d'hydrogène faisant partie de la 3^{ème} génération de biocarburants.

A court terme, une approche de biotechnologie écosystémique comme la méthanisation a déjà fait la preuve que l'association dépollution/traitement et production de biocarburants est certainement plus viable économiquement et écologiquement que la valorisation de co-produits issus d'organismes modifiés génétiquement.

A plus long terme, des procédés associant en amont une biotechnologie écosystémique comme le compostage de déchets agricoles cellulosiques permettant de récupérer de l'éthanol et en aval un traitement physico-chimique des résidus de compostage comme la gazéification hydrothermale peut paraître intéressante pour compléter la dégradation de la biomasse et élargir la panoplie de carburants vers les gaz CH₄ et H₂.

Biotechnologies et biocarburants de 3^{ème} génération.

Les biocarburants de 3^{ème} génération seront encore plus biotechnologiques car ils seront produits par des microorganismes en milieu aqueux recyclé et hors sols soit sous forme de déchets du métabolisme (H₂) soit comme constituants de la biomasse produite (sucres et huiles).

Pour la production de biocarburants de 3^{ème} génération, les microorganismes photosynthétiques (microalgues phytoplanctoniques et cyanobactéries) présentent a priori les meilleures potentialités et quelques avantages :

- Quelques 200 000 espèces inexploitées dont seules quelques dizaines sont connues et cultivées.

- Contrairement aux végétaux supérieurs terrestres, les organismes photosynthétiques aquatiques ne produisent pas de cellulose et de bois et toute leur photosynthèse est orientée vers la production de polysaccharides (chaînes de sucres plus faciles à casser que la cellulose), d'huiles et de protéines qui sont tous valorisables en biocarburants (sucres ou huiles) ou en industrie du vivant (protéines).
- L'utilisation de CO₂ comme source de carbone et la possibilité de recycler en carbone renouvelable du CO₂ issu de carburants ou carbonates fossiles.
- Les besoins en nutriments (N, P, S) qui permettent d'envisager l'utilisation d'eaux polluées par des activités agricoles ou domestiques et de compléter l'épuration par leur fixation dans la biomasse algale.
- La culture en milieu aqueux hors sol qui peut se pratiquer sur des surfaces non agricoles, en surface de milieux aquatiques naturels ou dans des zones arides bien ensoleillées.
- La possibilité de cultiver en systèmes clos avec recyclage totale de l'eau après récolte.

Les microorganismes hétérotrophes aérobies ne présentent à priori pas beaucoup d'intérêt car il faudrait une source de carbone organique pour les faire pousser. Autant transformer cette source de carbone organique en biocarburants de 2^{ème} génération. A l'heure actuelle deux voies de production de biocarburants de 3^{ème} génération font l'objet de recherches :

Ethanol et diesel de microorganismes photosynthétiques

Une culture de microorganismes photosynthétiques peut transformer du CO₂ en polysaccharides et huiles par photosynthèse. Les polysaccharides étant transformés ensuite en sucres par voie enzymatique puis en éthanol par fermentation. Les huiles quant à elles, comme les huiles végétales, pouvant s'utiliser pures ou estérifiées, venant en substitution de carburants diesel ou kérosène.

Les cultures de microorganismes photosynthétiques se heurtent cependant aux mêmes problèmes que les cultures de champignons filamenteux pour la production d'enzymes. Cultivés à petite échelle dans des systèmes stériles ou en conditions axéniques et bien éclairés, les microorganismes photosynthétiques sont capables de produire des molécules à haute valeur ajoutée dont la rareté fait le prix. Des espèces de microorganismes photosynthétiques sont cultivées aujourd'hui en petites quantités pour des applications aussi variées que l'aquaculture larvaire, les marqueurs biochimiques, les cosmétiques, la diététique et la production de molécules à très haute valeur ajoutée.

Sur la base de la productivité en huile de certains microorganismes photosynthétiques cultivés en systèmes optimisés, à petite échelle, en laboratoire, certains chercheurs pensent que sur 1% de la surface des terres cultivées actuellement aux USA on pourrait produire la moitié des carburants consommés dans ce pays.

Cependant, pour passer à des échelles plus économiques de production de biocarburants deux axes se dessinent :

- Un axe biotechnologique moléculaire qui part du principe que pour atteindre des fortes productions à l'hectare éclairé il faut entièrement maîtriser la souche cultivée, le milieu aqueux dans lequel elle pousse en absence de prédateurs et compétiteurs ainsi que l'éclairage des cellules. Dans un tel système de production, il est intéressant de modifier génétiquement la souche pour lui faire produire, grâce à sa machinerie photosynthétique tout un ensemble de molécules à partir de CO₂ fossile beaucoup moins cher que les substrats utilisés et améliorer ses rendements en sucres, huiles pour les biocarburants. L'inconvénient majeur de cette voie est qu'on ne voit pas actuellement comment un système renfermant des milliers de m³ d'eau au soleil pourrait être préservé de prédateurs ou compétiteurs microscopiques avec des moyens techniques et humains compatibles avec la faible valeur ajoutée de la production à grande échelle. Les produits à haute valeur ajoutée ne peuvent pas compenser le prix des biocarburants dans la mesure où s'ils sont produits à grande échelle les prix des co-produits vont baisser considérablement. De fait, tous les essais d'extrapolation des techniques de culture monospécifique en photoréacteurs réalisés dans la deuxième moitié du 20^{ème} siècle, se sont soldés par des échecs. L'énergie et la main d'œuvre nécessaires pour « stériliser » l'équipement, l'ensemencer massivement, faire circuler la culture, la refroidir et récolter les cellules s'avérant prohibitifs au même titre que l'investissement à réaliser. Cela n'empêche pas la poursuite des recherches sur le métabolisme et l'amélioration génétique de certains microorganismes photosynthétiques producteurs de biocarburants même si l'on ne voit pas aujourd'hui comment les cultiver de façon économique.

- Un axe biotechnologique écosystémique qui est celui adopté par l'agriculture terrestre. Celle-ci utilise la biodiversité microbiologique des sols, milieux de culture naturels, pour se développer. Les prédateurs et compétiteurs en profitent également mais il y a des solutions diverses pour s'en préserver. Dans les années 1980 et 1990 des essais de culture extensive de microorganismes photosynthétiques en milieux aquatiques naturels ou artificiels ont montré que cette approche était possible pour des produits à faible valeur ajoutée comme les produits agricoles. Malheureusement, il semble qu'aujourd'hui les recherches menées sur les biocarburants de 3^{ème} génération ne s'intéressent pas vraiment à cet axe.

Comme pour la méthanisation, les cultures de microorganismes photosynthétiques ne peuvent a priori être valorisées que dans une approche écosystémique et en association avec des traitements de dépollution. Deux types de traitements peuvent être associés aux cultures photosynthétiques :

- La fixation de CO₂ fossile en carbone organique renouvelable. Des cultures à grande échelle capables de produire des millions de tonnes de biomasse fixeraient forcément des millions de tonnes de CO₂. Le coût du CO₂ fossile fixé viendrait en déduction du coût de production de l'huile ou de l'alcool où s'intègrent et se renouvèlent les atomes de carbone. Une telle production serait alors à coût de matières premières négatifs et non soumis à l'effet d'échelle (les prix ne baissent pas pour de grosses quantités).

- La fixation d'azote, de phosphore et de soufre dont les composés oxydés sont très solubles dans l'eau et qui s'accumulent dans les milieux aquatiques

soumis aux activités agricoles, domestiques ou industrielles. Ces composés sont des nutriments indispensables au développement des microorganismes photosynthétiques aquatiques. La production de microorganismes photosynthétiques serait alors associée à l'épuration d'eau en sortie de station de traitement d'effluents ou en entrée de station de production d'eau potable à partir d'eau superficielles ou souterraines polluées.

Dans les deux cas, les faibles productivités en biomasse seraient compensées par les capacités épuratrices des cultures. Les microorganismes photosynthétiques rendent ce service écosystémique dans toutes les étendues d'eau naturelles. L'extraction des polysaccharides, huiles et protéines valorisables serait facilitée par l'absence de bois et de cellulose dans la biomasse. Enfin, après extraction, on peut envisager de traiter les résidus de biomasse humide par gazéification hydrothermale et produire ainsi des carburants complémentaires.

Hydrogène photosynthétique

La photosynthèse comprend une étape de lyse de la molécule d'eau pour lier le carbone du CO₂ à l'hydrogène de l'eau. Des organismes photosynthétiques produisent des enzymes appelés hydrogénases capables de réaliser cette réaction.

On considère que certains microorganismes photosynthétiques pourraient produire de l'hydrogène dans des conditions de culture très strictes. Cela nécessiterait cependant des modifications génétiques sur une espèce sélectionnée et des techniques de culture dont le passage à grande échelle n'est pas envisageable à l'heure actuelle. En laboratoire et à très petite échelle, on fera produire de l'hydrogène à des microorganismes modifiés photosynthétiques ou non, mais ce sera en très faible quantité. On peut toujours rêver et croire qu'un jour, des véhicules munis d'un photoréacteur biologique sur le toit et d'une pile à combustible pourront se déplacer grâce à la photosynthèse. Ce serait une autre forme d'énergie solaire.

Encore au stade de recherche fondamentale, l'hydrogène issu de la photosynthèse se heurtera un jour aux limites des biotechnologies classiques pour sa production. Il existe certainement des écosystèmes producteurs d'hydrogène qu'il serait intéressant d'étudier dans la perspective d'une future production d'hydrogène naturel, à échelle économique et peu gourmande en énergies fossiles ou renouvelables.

Conclusions

Les biotechnologies se sont développées essentiellement pour des applications pharmaceutiques. L'ingénierie moléculaire et génétique a permis ce développement rapide et représente aujourd'hui pour les chercheurs l'espoir de valoriser des recherches sur des marchés captifs de très faibles tonnages ou de déposer des brevets sur des organismes modifiés.

Le développement de carburants biotechnologiques de 2^{ème} et 3^{ème} génération nécessitera certainement un changement de culture ou une véritable « mutation » dans les biotechnologies et chez les biotechnologues. S'il paraît aujourd'hui difficile de breveter le fonctionnement d'un écosystème naturel ou artificiel que l'on connaît très mal, il semble plus simple de breveter des procédés de culture, récolte, traitement, extraction et purification. Comme pour l'agriculture, les biotechnologies écosystémiques utilisent des caractéristiques et qualités des écosystèmes qui sont encore difficiles à mesurer et à modéliser. La biodiversité des microorganismes et leurs relations trophiques dans les écosystèmes font partie de ces caractéristiques dont nous avons une vision empirique ou très partielle. Le développement de recherches dans ces domaines ne garantit pas forcément le changement culturel et n'est peut-être pas nécessaire pour développer de nouveaux procédés de production de biocarburants plus économiques et plus respectueux de la biosphère car associés à la préservation et l'utilisation des services écosystémiques.

Pour différentes raisons, on peut penser que les procédés de biotechnologie classique auront beaucoup de mal à changer d'échelle et à baisser les coûts des biocarburants produits par cette voie. Les procédés de biotechnologie écosystémique permettent un changement d'échelle mais celui-ci reste limité par les capacités d'approvisionnement en carbone organique (biomasses), CO₂ ou eaux « polluées ». Les biotechnologies écosystémiques n'atteindront certainement pas les échelles de production des hydrocarbures fossiles (gaz, pétrole, charbon). Ils deviendront cependant économiques dans la mesure où, associés à des dépollutions et utilisant les capacités naturelles des écosystèmes, les coûts d'investissement et de fonctionnement se rapprochent de ceux des activités agricoles et sont compensés par les gains des activités d'épuration associées.