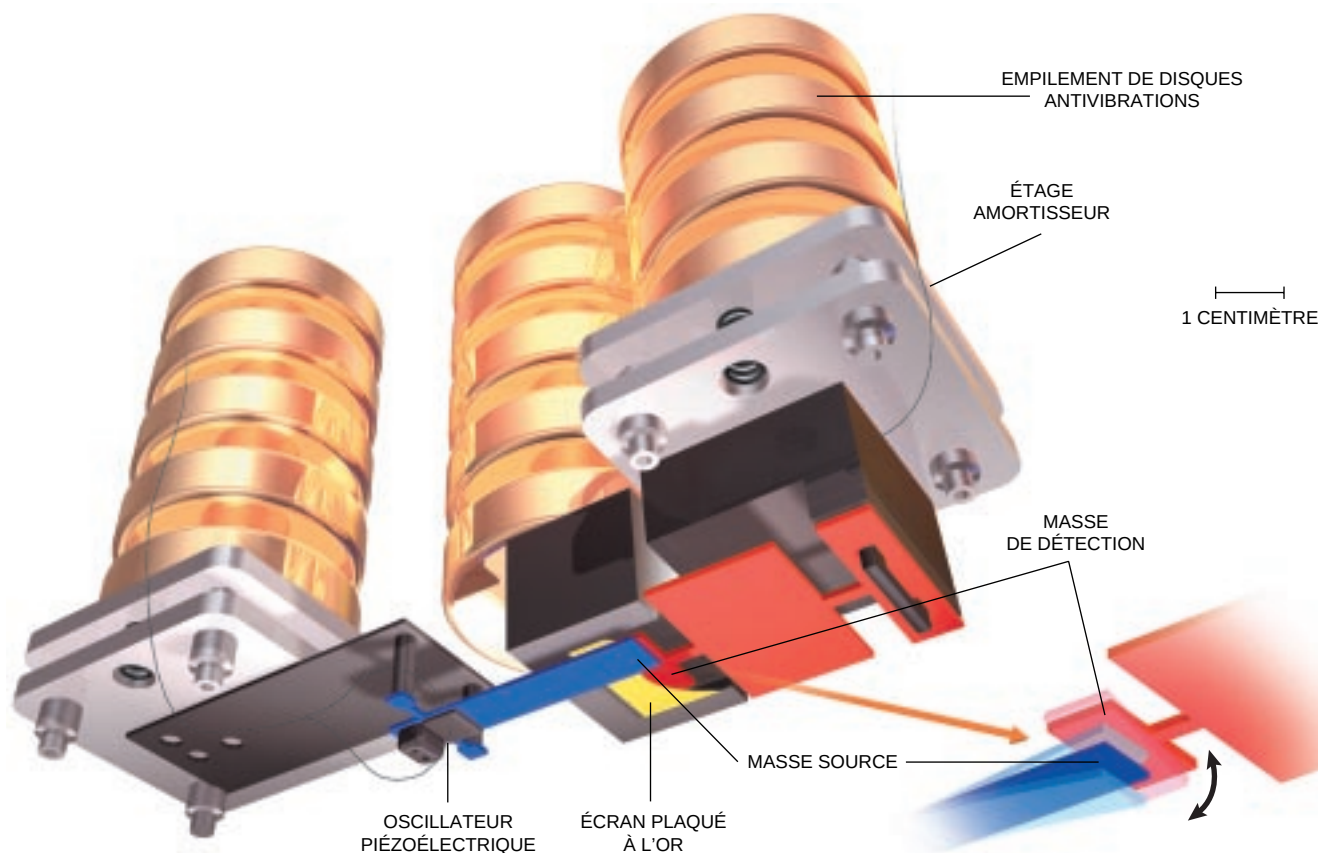




**8. UN OSCILLATEUR À TORSION**, construit à l'Université du Colorado, mesure des forces de gravitation à des distances comprises entre 0,05 et 1,0 millimètre. Des cristaux piézo-électriques font vibrer une lame en tungstène (*en violet*) comme un plongeur. Toute force agissant entre la masse source et le détecteur (également en tungstène, *en rouge*) produit des oscillations de torsion du détecteur (*cartouche*), qui sont détectées par un dispositif électronique. Un bouclier recouvert d'une mince couche

d'or supprime les forces électrostatiques, et la suspension des piles d'isolation en laiton empêche les vibrations de se propager de la source au détecteur. Les boucliers électrostatiques entourant le dispositif ne sont pas représentés ici. On attend cette année les résultats des expériences effectuées à la température ambiante. Ultérieurement, afin d'obtenir des mesures plus précises, on refroidira le dispositif à l'hélium liquide, jusqu'à une température de quatre kelvins ( $-269^{\circ}\text{C}$ ).

idée, Joseph Lykken a ensuite tenté d'abaisser l'échelle d'unification à  $10^{-19}$  mètre, mais sans invoquer de grandes dimensions supplémentaires. De leur côté, Keith Dienes et Tony Gherghetta, au CERN, ont observé en 1998 que des dimensions supplémentaires de rayon inférieur à  $10^{-19}$  mètre permettraient une unification des forces à des distances bien supérieures à  $10^{-32}$  mètre.

Après la publication de notre théorie, en 1998, plusieurs propositions dérivées sont apparues. Toutes font appel aux mêmes ingrédients de base : des dimensions supplémentaires cycliques et un modèle de monde sur une membrane. Ainsi, nos collègues Lisa Randall et Raman Sundrum ont proposé que la gravitation soit confinée dans une membrane à cinq dimensions infinies (non cycliques). Dans un tel univers, la gravitation serait nécessairement plus faible, car nous ne serions pas sur la membrane où elle se fait sentir.

Toutes ces théories cherchent d'abord à résoudre le même pro-

blème de la hiérarchie. Pendant 20 ans, on a laissé l'échelle de Planck à  $10^{-35}$  mètre tout en supposant que les interactions changent à partir de  $10^{-19}$  mètre. Cette approche a le défaut de reléguer toute tentative de quantifier la gravitation au statut de pure spéculation théorique, à jamais hors de portée de l'expérience ! Les deux années écoulées ont révélé une nouvelle voie. Si des dimensions cachées existent, si nous détectons bientôt des écarts par rapport à la loi de New-

ton, si le LHC révèle l'existence de minuscules trous noirs et d'états exotiques dus aux vibrations des cordes, la théorie quantique de la gravitation et celle des cordes deviendront des théories réfutables. Quoi qu'il en soit, l'étude du comportement de la gravité dans le domaine submillimétrique va enfin être entreprise. Avant 2010, nous appréhenderons mieux pourquoi la gravitation est si faible et nous saurons peut-être dans quel univers nous vivons.

Nima ARKANI-HAMED, Savas DIMOPOULOS et Georgi DVALI ont inventé la théorie des dimensions supplémentaires alors qu'ils étaient réunis à l'Université de Stanford, en février 1998. N. Arkani-Hamed est physicien à l'Université de Berkeley. S. Dimopoulos est professeur de physique à l'Université de Stanford. G. Dvali est professeur de physique à l'Université de New York.

Michael DUFF, *Les nouvelles théories des cordes*, in *Pour la Science*, avril 1998.

Edward KEARNS, Takaaki KAJITA et Yoichi TOITSUKA, *La détection des neutrinos massifs*, in *Pour la Science*, septembre 1999.

Brian GREENE, *The Elegant Universe : Superstrings, Hidden Dimensions and the Quest for the Ultimate Theory*, W.W. Norton, 1999.

Steven WEINBERG, *Vers l'unification de la physique*, in *Pour la Science*, janvier 2000.

Chris Llewellyn SMITH, *Le Grand Collisionneur de hadrons*, in *Pour la Science*, septembre 2000.

# Des plastiques extraits des plantes



TILLMAN GERNGROSS • STEVEN SLATER

*Techniquement, les ingénieurs savent faire des matières plastiques à partir de plantes chlorophylliennes plutôt qu'à partir de combustibles fossiles. Ces plastiques préserveront-ils l'environnement ?*

Quelques régions du Globe abritent aujourd'hui des champs de maïs d'un type particulier : dans les feuilles, des granules de matière plastique sont fabriqués par la plante. Un vieux rêve des écologistes devient techniquement réalisable : les végétaux produiront à la fois des matières alimentaires et des matériaux, sans que les réserves de pétrole soient dilapidées.

Chaque année, les usines pétrochimiques du monde engloutissent 270 millions de tonnes de pétrole et de gaz dans la fabrication des matières plastiques. Les combustibles fossiles fournissent l'énergie et la matière première nécessaires à la transformation du pétrole brut en matériaux tels que le polystyrène, le polyéthylène ou le polypropylène. Des emballages de lait aux bouteilles de boissons gazeuses ou d'eau minérale, en passant par les pièces automobiles et les vêtements, les matières plastiques sont partout dans notre vie. Toutefois, la pérennité de leur production par les méthodes classiques est débattue.

On estime que les ressources mondiales en pétrole seront épuisées dans environ 80 ans, celles de gaz naturel dans 70 ans et les gisements de charbon dans 700 ans. La raréfaction progressive de ces matières organiques s'accompagnera inévitablement d'une augmentation de leur coût. Aussi, depuis quelques années, plusieurs pays ont demandé à leurs organismes de recherche de mettre au point des substituts végétaux des ressources fossiles, aussi bien comme combustibles que comme matières premières.

Progressivement, des biochimistes ont découvert comment on peut modifier les végétaux pour qu'ils produisent du plastique. Cette avancée technique assurait en apparence la durabilité des ressources, car les plastiques produits par les plantes semblaient «verts» à double titre : ils étaient fabriqués à partir d'une ressource renouvelable, et ils étaient décomposés par biodégradation après usage. Des travaux récents ont pourtant remis en question l'intérêt de telles approches.

D'abord, la dégradation des plastiques libère du gaz carbonique et du méthane, deux gaz à effet de serre dont on essaye de limiter les émissions. Ensuite, l'énergie nécessaire à l'extraction du plastique des plantes requiert des combustibles fossiles. Pire encore, cette extraction nécessite bien plus d'énergie qu'on le soupçonnait. Les plastiques «verts» ne s'imposeront industriellement que si les biochimistes surmontent cet obstacle sans créer de nuisances environnementales supplémentaires.

## Moins de pétrole

La fabrication classique des matières plastiques utilise des quantités élevées de combustibles fossiles. Certes, 90 pour cent du pétrole utilisé l'est par les transports ou par les centrales thermiques, mais l'industrie des plastiques consomme l'essentiel de ce qui reste, soit quelque 80 millions de tonnes par an rien qu'en Europe et la même quantité aux États-Unis. Jusqu'à aujourd'hui, les industries agro-alimentaires et biotechnologiques ont pro-

posé trois approches pour remplacer les plastiques classiques par des produits dérivés des plantes : la transformation des sucres des plantes en plastique, la production de plastique par des micro-organismes et la production directe de plastique par le maïs ou par d'autres plantes cultivées.

En 1977, le géant de l'industrie agricole (*Cargill*) et une grande société de l'industrie chimique (*Dow Chemical*) ont joint leurs efforts pour tenter de transformer les sucres du maïs en un plastique nommé acide polylactique (APL ou PLA en anglais). Des micro-organismes transforment les sucres en acide lactique, puis les molécules d'acide lactique sont polymérisées en un enchaînement de macromolécules dotées de propriétés semblables à celles du téréphtalate de polyéthylène (ou PET), un plastique d'origine pétrochimique très utilisé pour les bouteilles d'eau minérale. Ce nouveau produit dérivé du maïs s'ajoute aux sirops à forte teneur en fructose, à l'acide citrique, à l'huile alimentaire, au bioéthanol et à la nourriture pour les animaux. En 1999, aux États-Unis, l'industrie de ces dérivés a traité 39 millions de tonnes de maïs, soit près de 15 pour cent de la récolte annuelle. Au début de l'année 2000, les industriels ont investi près de deux milliards de francs (300 millions d'euros) pour produire ce nouveau plastique (voir l'encadré de la page 70).

**1. LA PRODUCTION DE MATIÈRES PLASTIQUES** par les plantes semblait être une manière efficace de réduire la consommation mondiale de combustibles fossiles.





Tom Draper Design

D'autres sociétés, telle *Imperial Chemical Industries*, ont étudié la production d'un second plastique, le polyhydroxyalcanoate (PHA). Le PHA résulte également de la conversion de sucres végétaux et il est biodégradable. On l'obtient directement, à l'aide de la bactérie *Ralstonia eutropha*, alors que la synthèse du PLA nécessite une étape de polymérisation en dehors du micro-organisme pour convertir le monomère en plastique.

En réaction à la crise du pétrole des années 1970, la Société *Imperial Chemical Industries* avait mis au point un procédé industriel de fermentation où des micro-organismes convertissaient les sucres végétaux en PHA. Le plastique ainsi obtenu était moulé en articles commerciaux, comme des rasoirs biodégradables et des bouteilles de shampoing. Ce «bioplastique» était toutefois nettement plus coûteux que ses équivalents synthétiques dérivés de combustibles fossiles. Son seul avantage était sa biodégradabilité. La Société *Monsanto* a racheté les brevets associés en 1995, mais sa rentabilité restait incertaine.

Depuis, de nombreuses équipes ont redirigé leurs efforts vers la production de PHA par la troisième voie : la production directe de plastique par les plantes. En modifiant le patrimoine génétique de plantes cultivées afin qu'elles synthétisent un plastique directement sur pied, on s'affranchissait de l'étape de fermentation. Au lieu de cultiver la plante, de la récolter et de la traiter pour en extraire des sucres que l'on transformerait ensuite en plastique par fermentation, on la récolterait directement et l'on en extrairait directement le plastique. Cette approche, considérée par beaucoup comme la plus efficace, a été très étudiée.

Vers le milieu des années 1980, l'un de nous (S. Slater) faisait partie d'une équipe qui isolait les gènes conférant aux bactéries la capacité de synthétiser des plastiques. Les biologistes avaient alors supposé que l'insertion de ces enzymes dans une plante augmenterait le nombre de protéines qui transformeraient l'acétylcoenzyme A (un composé qui se forme de manière naturelle lors de la transformation de la lumière solaire en énergie) en un certain type de plastique. Cette hypothèse fut vérifiée en 1992 par des biologistes qui modifièrent génétiquement l'*Arabidopsis thaliana* pour lui faire pro-

duire un type de PHA qui restait cassant. Deux ans plus tard, la Société *Monsanto* travaillait à l'obtention d'un PHA plus souple à partir d'une plante de grande culture, le maïs.

Afin de préserver la production alimentaire, les biologistes voulaient faire produire ce plastique à partir d'éléments de la plante qui ne sont généralement pas récoltés : les feuilles et la tige. Les fermiers récolteraient d'abord les épis, puis un second passage récupérerait les feuilles et la tige, dont on extrairait le plastique. Toute la plante serait ainsi utilisée.

### Trop d'énergie et trop d'émissions

Les biologistes ont progressivement augmenté les quantités de plastiques qui s'accumulent dans le maïs modifié et ils ont cherché à perfectionner le matériau produit, mais séparément. Quand on augmente le rendement, la qualité du plastique produit est moindre, et réciproquement. Ce compromis résulte du mode de production du plastique. Ce sont les chloroplastes des feuilles qui semblent le meilleur lieu de production pour les bioplastiques : ces chloroplastes sont des organites intracellulaires de cellule végétale dont la fonction est l'absorption de la lumière et la synthèse de glucides ; l'accumulation de plastique inhibe la photosynthèse et réduit le rendement en grains.

La séparation du plastique à partir du matériel végétal est difficile. Initialement, les ingénieurs avaient simplement envisagé d'extraire les bioplastiques dans les usines de traitement du maïs déjà existantes. Toutefois, l'extraction et la purification du plastique imposent l'utilisation d'énormes quantités de solvant, qu'il faut récupérer après utilisation. La taille et la complexité des unités de traitement sont alors du même ordre que pour les installations pétrochimiques de fabrication des plastiques.

Ces obstacles techniques auraient pu être surmontés, mais une difficulté supplémentaire apparut. En calculant l'énergie et la quantité de matière première requises par le procédé de récupération du bioplastique (récolte et séchage des parties vertes de la plante, purification du plastique, séparation et recyclage du solvant, mélange du plastique pour produire une résine), nous avons constaté que la fabrication

consommerait encore plus de combustibles fossiles que la plupart des procédés de fabrication pétrochimiques.

Dans notre étude la plus récente, terminée au printemps 2000, nous avons déterminé que la fabrication de un kilogramme de PHA à partir de maïs génétiquement modifié nécessiterait trois fois plus d'énergie que la fabrication d'une quantité égale de polyéthylène à partir de combustibles fossiles (29 mégajoules). La déception fut considérable. Avec les procédés actuels, les industries de transformation du maïs utiliseraient 2,65 kilogrammes de combustibles fossiles pour récupérer un kilogramme de PHA, alors que la production de un kilogramme de polyéthylène ne consomme que 2,2 kilogrammes de pétrole brut et de gaz naturel.

Dans une étude antérieure, l'un de nous (T. Gerngross) avait montré que la production de un kilogramme de PHA par fermentation microbienne nécessite une quantité comparable (2,39 kilogrammes) de combustibles fossiles. Ces constatations décevantes expliquent pourquoi la Société *Monsanto* a interrompu la mise au point de ces méthodes de production de bioplastique. Aujourd'hui, le seul plastique dérivé de plantes commercialisé est le PLA de la Société *Cargill Dow*. Ce mode de production nécessite 20 à 50 pour cent de moins de combustibles fossiles que la fabrication de plastique pétrochimique ; il reste plus gourmand en énergie que la plupart des procédés pétrochimiques, mais l'optimisation des procédés industriels réduira cette consommation.

On réduirait la quantité de combustibles fossiles consommés en utilisant d'autres sources de sucres d'origine végétale, dont le traitement requiert moins d'énergie, tels la betterave à sucre ou le blé. Les chercheurs de *Cargill Dow* estiment que la première unité de fabrication de PLA, en cours de construction dans le Nebraska, consommera au maximum 56 mégajoules d'énergie par kilogramme de plastique produit, soit 50 pour cent, plus de ce qu'il faut pour produire la même quantité de PET, mais 40 pour cent de moins que pour la production du Nylon.

La production des bioplastiques pose un second problème environnemental, plus préoccupant encore que le premier. Si la production des plastiques classiques consomme du pétrole



brut, la fabrication des bioplastiques consomme essentiellement du charbon et du gaz naturel. Le charbon est plus abondant que le pétrole, mais il pose des problèmes d'effet de serre : l'ensemble des combustibles fossiles utilisés pour la fabrication du plastique à partir de matières premières renouvelables (le maïs) doit être brûlé, afin de libérer de l'énergie, alors que les procédés pétrochimiques incorporent une proportion importante de la ressource fossile dans le produit final.

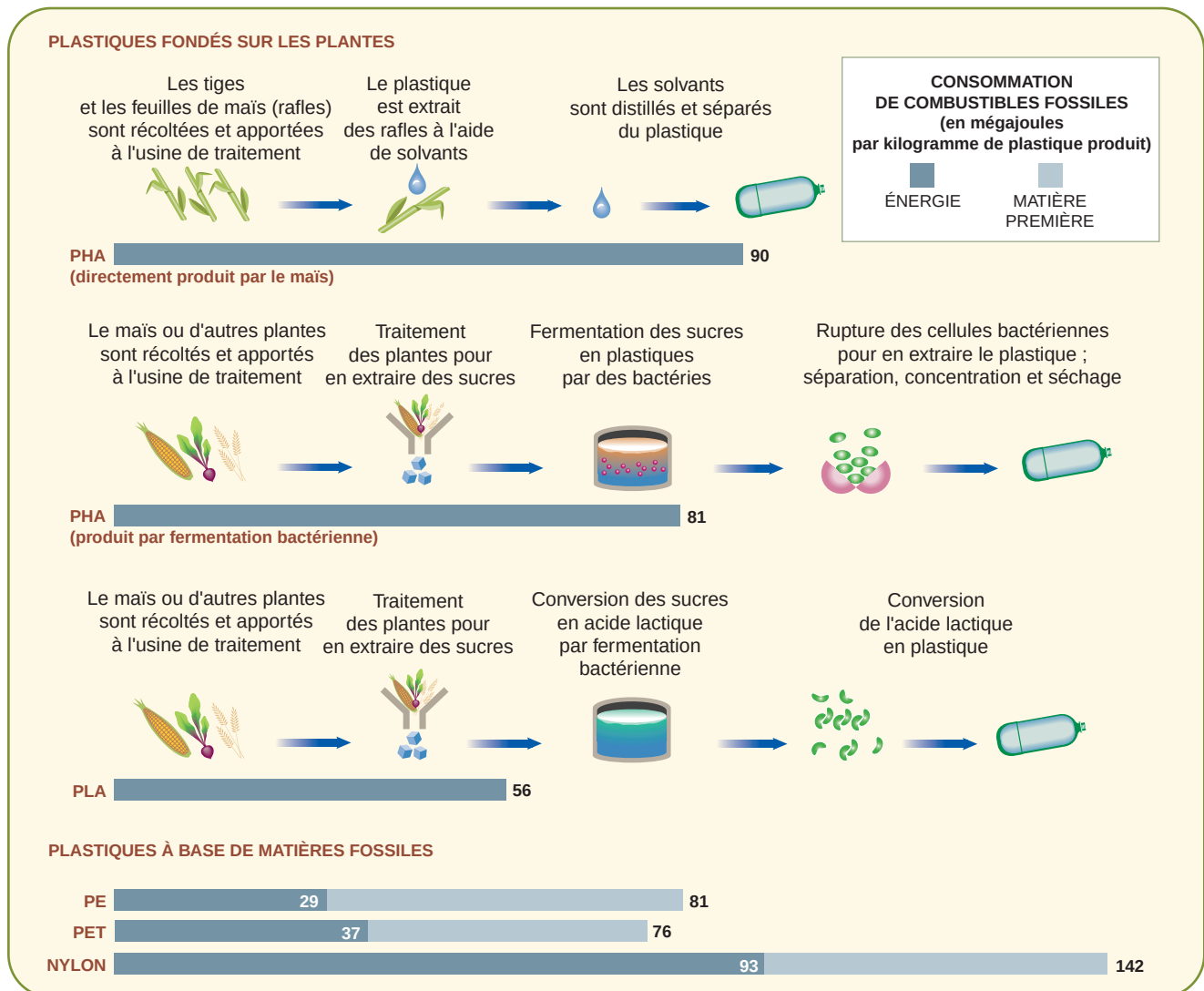
La combustion de quantités accrues de combustibles fossiles augmente les émissions de gaz à effet de serre, tel que le gaz carbonique. D'autres émissions associées à l'énergie fossile, comme celles de dioxyde de soufre, un gaz qui contribue aux pluies acides, augmenteront également.

Au total, les avantages environnementaux découlant de la produc-

tion de plastiques par les plantes sont plus qu'annihilés par un accroissement inacceptable de la consommation d'énergie et des émissions de gaz nuisibles. Le PLA apparaît alors comme le seul bioplastique compétitif. Bien que cette solution ne soit pas aussi élégante que la production directe de PHA par des plantes, elle bénéficie de deux facteurs qui contribuent à son efficacité : la consommation énergétique est réduite et le taux de conversion est élevé (80 pour cent de chaque kilogramme de sucre utilisé se retrouvent dans le produit final). Toutefois, malgré les avantages de la production de PLA par rapport à celles d'autres bioplastiques, sa production entraînera inévitablement l'émission de quantités de gaz à effet de serre supérieure à celle de nombreux produits équivalents dérivés du pétrole.

## Les énergies renouvelables

La production de plastiques verts est-elle alors utopique ? Pas nécessairement, si l'on envisage la combustion de matière végétale, ou biomasse, pour compenser en partie les besoins accrus d'énergie. Les émissions engendrées par cette combustion sont en effet plus favorables à l'environnement. Au lieu de relâcher du gaz carbonique issu du carbone fossile, à l'intérieur de la Terre depuis des millions d'années, la combustion des plantes n'augmente pas le contenu total de carbone de l'atmosphère : la pousse de nouvelles plantes, la saison suivante, absorbe une quantité de gaz égale à celle qui a été émise au cours de la combustion (pour cette même raison, l'incinération des plastiques dérivés de plantes n'accroît pas la concentration en gaz carbonique dans l'atmosphère).



**2. PRODUCTION DES PLASTIQUES et consommation d'énergie.** Par rapport à ses équivalents pétrochimiques, la production des plastiques dérivés des plantes nécessite un surcroît d'énergie et une augmentation des émissions de gaz à effet de serre.

En utilisant la biomasse comme source primaire d'énergie, la production de bioplastique dépendrait moins des ressources fossiles. Si l'on brûlait l'ensemble des résidus végétaux qui restent après extraction du plastique, on obtiendrait une quantité d'électricité plus que suffisante pour extraire les PHA que contiennent les plantes. L'excédent pourrait même être utilisé dans des centrales thermiques, ce qui réduirait l'effet de serre.

Notons que c'est l'utilisation d'une source d'énergie à base de plantes, et non l'utilisation des plantes comme matière première, qui contribue le plus à l'amélioration de l'environnement. Lorsque l'on dissocie la production de plastique de la production d'énergie, on constate que, quelle que soit l'ap-

proche utilisée pour fabriquer du plastique, l'utilisation d'énergies renouvelables est plus rationnelle que la combustion des ressources fossiles.

Pourquoi fournir de l'énergie à un mécanisme qui requiert plus d'énergie si nous pouvons fabriquer des plastiques classiques avec beaucoup moins d'énergie et, par conséquent, moins d'émissions de gaz à effet de serre? La solution la plus écologique serait-elle alors la fabrication du plastique à partir de pétrole, la combustion de la biomasse renouvelable fournissant l'énergie de la transformation? Ainsi, on réduirait les émissions de gaz à effet de serre et l'on économiserait les ressources fossiles.

Malheureusement, les choses ne sont pas aussi simples, et aucune des

méthodes proposées ne regroupe tous les avantages. La fabrication des plastiques classiques requiert des combustibles fossiles comme matière première. Ces plastiques ont des propriétés plus variées que le PHA et le PLA, mais ils ne sont pas biodégradables. La biodégradabilité résout le problème de l'élimination des déchets solides, mais elle libère des gaz à effet de serre. Du point de vue technique, la production de PLA et de PHA par fermentation à partir des plantes est plus simple que l'extraction de PHA produit directement par le maïs, mais une telle approche empiète sur l'utilisation de terres cultivables à des fins de production alimentaire. Bien que la production de PLA nécessite moins de ressources fossiles que celle des plas-

## La production industrielle des plastiques verts

**P**atrick Gruber, de la Société *Cargill Dow*, prépare la production de nouveaux plastiques dérivés des plantes.

**Pour la Science :** Le plastique que vous produisez, le PLA *NatureWorks*, concurrencera-t-il les plastiques pétrochimiques?

**Patrick Gruber :** La plupart des plastiques d'origine pétrochimique ont des propriétés très ciblées. Ainsi, le polystyrène se prête particulièrement bien au moulage des gobelets à café, mais sa résistance et sa dureté sont limitées. Un spectre réduit de performances limite les applications potentielles d'un plastique. Le PLA *NatureWorks* a plusieurs qualités : on peut le sceller à chaud comme le polystyrène, lui appliquer une forme permanente par pliage, comme le polypropylène, et il conserve les torsions, comme la cellophane. Quelques sociétés ont déjà utilisé le PLA pour les emballages de confiseries et pour conditionner des produits de grande consommation. À partir du PLA, l'industrie textile obtient une fibre naturelle qui concurrence des fibres synthétiques comme le Nylon, tant du point de vue des performances que de la facilité de mise en œuvre. Dans l'ensemble, l'industrie pourrait utiliser plus de quatre millions de tonnes de PLA dans des domaines aussi divers que les accessoires, les vêtements de sport, les produits d'hygiène, le mobilier domestique les conditionnements et les emballages.

**PLS :** Quels sont les avantages écologiques du PLA?

**P.Gruber :** Grâce à l'utilisation de sucres extraits des plantes comme matière première à la place des combustibles fossiles, la fabrication du PLA consomme 20 à 50 pour cent de moins de ressources fossiles que celle des plastiques classiques. Tout comme les autres plastiques, le PLA peut être recyclé ou dégradé ; comme le papier, le PLA est également biodégradable. Le PLA réduira la dépendance de notre

société vis-à-vis des combustibles fossiles tout en fournissant des produits adaptés aux méthodes d'élimination actuelles. Si les utilisateurs sont suffisamment sensibles aux problèmes écologiques, le PLA sera avantagé.

**PLS :** Ces avantages suffisent-ils à compenser le besoin d'énergie supérieur pour sa fabrication?

**P.Gruber :** On perfectionne les techniques de fabrication du PLA depuis seulement dix ans, alors que les méthodes de fabrication des plastiques pétrochimiques ont 50 ans. Les besoins en énergie diminueront encore, mais même notre première unité de production, en cours de construction dans le Nebraska, utilisera 40 pour cent de moins de ressources fossiles que pour la fabrication de Nylon classique. Avec l'optimisation des conditions de production du PLA, nous comptons réduire de 39 pour cent la consommation en énergie de nos deuxième et troisième usines, dont la construction est prévue pour la première décennie de ce siècle.

**PLS :** Envisagez-vous d'aborder le problème des inconvénients potentiels du PLA sur l'environnement?

**P.Gruber :** Nous ne limitons pas nos efforts à la mise au point de

méthodes de production qui consommeront moins d'énergie : nous étudions aussi d'autres moyens plus efficaces de produire de l'énergie, telles la cogénération et l'utilisation de combustibles renouvelables, comme la biomasse végétale. Nous recherchons également d'autres sources de matière première pour le PLA : en utilisant les sucres fermentescibles des rafles de maïs, nous obtiendrions une seconde récolte sur des terres réservées à la production alimentaire de maïs en grains. Le PLA peut également être obtenu à partir de blé, de betteraves et d'autres plantes adaptées à des climats particuliers.



**CES EMBALLAGES DE CONFISERIES seront fabriqués à partir du nouveau plastique de Cargill Dow, produit à partir des plantes lorsque celui-ci sera commercialisé, à la fin de l'année 2001.**

tiques classiques, elle reste plus gourmande en énergie et libère par conséquent plus de gaz à effet de serre.

Que privilégier? La préservation des ressources? Le partage des surfaces cultivables? L'élimination des déchets solides? La réduction des émissions de gaz à effet de serre? La rentabilité? Quelle que soit l'approche choisie, l'utilisation d'énergie et les émissions qui en résultent dégradent l'environnement. On ne remplacera utilement les procédés pétrochimiques actuels que si l'on parvient à réduire les émissions de gaz à effet de serre et aussi à inverser le flux de carbone : pour piéger le carbone, on devra fabriquer des plastiques non dégradables à partir de sources ayant absorbé le gaz carbonique de l'atmosphère, les plantes par exemple. Le plastique serait enfoui après usage, ce qui piégerait le carbone dans le sol plutôt que de le renvoyer dans l'atmosphère. Certains plastiques biodégradables, y compris le PLA, pourraient même servir à piéger le carbone, car les décharges où aboutissent de nombreuses matières plastiques ne favorisent généralement pas la dégradation.

On ne peut pas demander à l'industrie du plastique de réduire la quantité de gaz carbonique dans l'atmosphère, mais l'industrie tout entière, et pas uniquement celle du plastique, bénéficierait de l'utilisation de matières premières renouvelables et de sources d'énergie renouvelables. Un tel passage nécessiterait d'importantes modifications de l'infrastructure mondiale de la production de l'énergie, mais un tel effort mérite qu'on s'y intéresse. Après tout, l'énergie renouvelable est l'un des ingrédients essentiels pour construire une économie durable et, en tant que telle, elle reste l'obstacle principal à la production de plastiques vraiment «verts».

Tillman GERNGROSS est professeur au Dartmouth College. Steven SLATER est chercheur dans la Société Cereon Genomics, une filiale de Monsanto.

Y. POIRIER, D.E. DENNIS, K. KLOMPARINS et C. SOMERVILLE, *Polyhydroxybutyrate, a Biodegradable Thermoplastic, Produced in Transgenic Plants*, in *Science*, vol. 256, pp. 520-622, avril 1992.

Tillman U. GERNGROSS, *Can Biotechnology Move Us toward a Sustainable Society?* in *Nature Biotechnology*, vol. 17, pp. 541-544, juin 1999.

## Une nouvelle rencontre de la science et de l'art.



### LES SECRETS DE LA CASSEROLE

Comment préparer plus de 20 litres de mayonnaise à partir d'un seul jaune d'œuf ? En explorant la physique des émulsions. Comment obtenir un bon rôti ? En empruntant à la chimie ses études des sucres et des acides aminés. Comment obtenir de bonnes gelées ? En reprenant les résultats récents de la physico-chimie des gels. Code 1585-130 F 224 pages



### RÉVÉLATIONS GASTRONOMIQUES

Encore un livre de recettes ! Oui, mais des recettes garanties par des expérimentations rigoureuses, par des analyses physico-chimiques des aliments et des tours de main culinaires. Chaque geste culinaire est ici disséqué, commenté du triple point de vue culinaire, physico-chimique et gastronomique. Code 1756-130 F 320 pages

**Ces deux ouvrages ont obtenu le Prix de l'Académie nationale de Cuisine 1997.**

### LA CASSEROLE DES ENFANTS

Laissés seuls pour la soirée, deux enfants doivent cuisiner leur dîner. Mais leur sens aigu de l'observation et de l'expérimentation leur fait découvrir les bases de la chimie et de la physique. Ce livre pourrait être un manuel, s'il n'évoquait les molécules et leurs transformations de façon si simple et si amusante.

Code 2309-80 F-128 pages



**BELIN**

Voir bon de commande page 98

