

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 assurerait en apparence la durabilité des ressources, car les plastiques produits par les plantes sembleraient « 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.



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