

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.

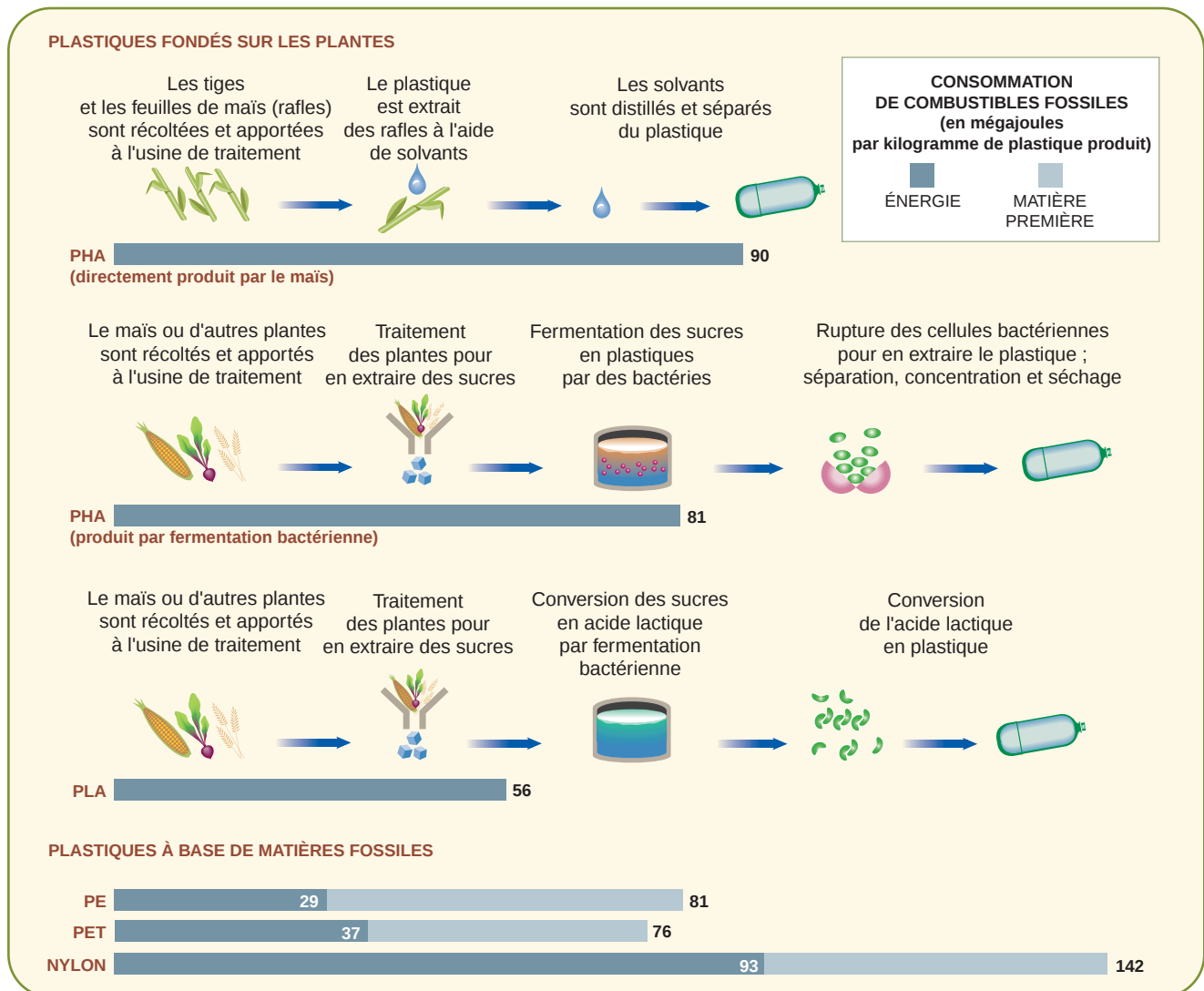
La combustion de quantités accrues de combustibles fossiles augmente les émissions de gaz à effet de serre, tel que le gaz carbonique. D'autres émissions associées à l'énergie fossile, comme celles de dioxyde de soufre, un gaz qui contribue aux pluies acides, augmenteront également.

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.