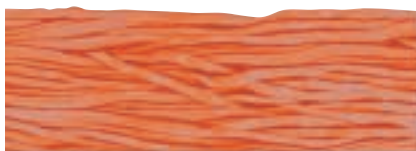


délavés en lavant les pantalons dans des machines chargées de pierres ponces, qui «usaient» le tissu.

Dès le début des années 1980, la Société Novo a introduit l'usage d'enzymes, nommées cellulases, résistant aux milieux basiques où les tissus sont plongés après le désencollage. Ces enzymes favorisent l'hydrolyse de l'extrémité des fibres cellulodiques qui composent le tissu ; par action mécanique, ces extrémités sont alors éliminées du corps du tissu et, avec elles, la teinture indigo, ce qui donne au jean son aspect délavé. Une petite dose d'enzymes remplace ainsi des kilogrammes de pierres ponces. Progressivement, la pierre ponce a été supplantée par les traitements enzymatiques. Par ailleurs, les

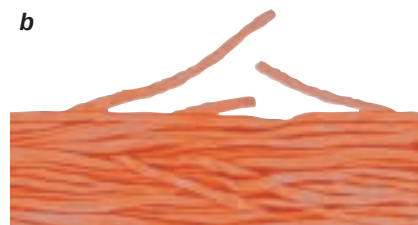
a



cellulases assouplissent les tissus en coton en «digérant» les parties endommagées des fibres textiles.

Le troisième domaine d'utilisation des enzymes dans le domaine des textiles est celui des détergents. En 1995, 13 milliards de tonnes de détergents d'usage domestique, c'est-à-dire servant au lavage des vêtements, ont été produits ; ils contiennent presque

b



tous (près de 90 pour cent d'entre eux) des enzymes. L'addition d'enzymes dans les détergents a permis aux producteurs de lessive de réduire les proportions d'autres ingrédients nuisibles pour l'environnement, et de diminuer les températures de lavage. Dans la majorité des applications, les enzymes sont utilisées comme produits auxiliaires et elles ne sont généralement

Les autres applications des enzymes d'extrémophiles

Pâte à papier

La première étape de fabrication du bois, dont les principaux constituants sont la cellulose, l'hémicellulose et la lignine, est la désintégration de ces constituants en une suspension de fibres de bois, la pâte à papier. Certaines étapes se déroulent à des températures élevées (entre 130 et 190 °C), en présence de concentrations élevées en acides ou en bases : les enzymes classiques ne sont pas utilisables.

Au cours des étapes ultérieures, on utilise diverses enzymes : des cellulases qui digèrent la cellulose et améliorent le drainage des pâtes ou assurent le désencrage ; des xylanases qui assurent le blanchiment des pâtes chimiques ; des amylases qui modifient l'amidon utilisé comme additif dans la fabrication de certains papiers.

Les déchets organo-chlorés issus des agents chimiques de blanchiment sont nuisibles pour l'environnement, et les fabricants de papier cherchent à en réduire la production. Une enzyme extrémophile, commercialisée en 1995 par la Société Novo Nordisk, potentialise l'effet des agents chimiques de blanchiment, de sorte que pour un même degré de blanchiment, la consommation de chlore est réduite de 30 pour cent environ.

La Société canadienne *Logen Corporation* a mis au point une nouvelle génération d'enzymes de blanchiment, qui réduit les émissions chlorées dans les usines de pâte à papier. Ces nouvelles enzymes ont été créées par les méthodes d'ingénierie des protéines : elles fonctionnent dans des milieux très basiques et vers 70 °C.

Industrie alimentaire

Des enzymes sont utilisées au cours de la production de la plupart des aliments industrialisés : bière, jus de fruits, vin, pain, arômes, huiles alimentaires, etc. Elles améliorent la qualité des produits et ouvrent la possibilité de mise au point d'aliments adaptés à des besoins spécifiques, par exemple des aliments pour les nouveau-nés ou pour les personnes âgées.

L'alimentation animale représente aussi un secteur industriel important, car on ajoute des enzymes dans les aliments pour animaux pour dégrader les fibres qui n'ont pas de valeur nutritionnelle et pour compléter les enzymes du tube digestif des animaux : le «rendement nutritif» des aliments absorbés est amélioré.

L'hydrolyse de l'amidon est effectuée par des enzymes. L'amidon, l'une des principales ressources alimentaires, est contenu dans le maïs, dans le blé, dans la pomme de terre, par exemple. L'utilisation de l'amidon exige plusieurs étapes réactionnelles, et l'on utilise diverses enzymes : des amylases, des protéases, des hémicellulases, des amyloglucosidases, des pullanases, des phospholipases ou des glucoses-isomérases.

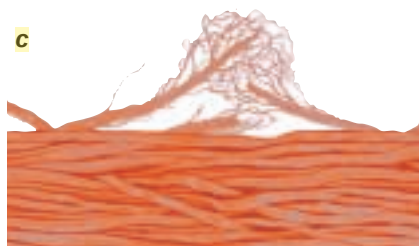
Selon les enzymes utilisées, la composition et les propriétés physico-chimiques des produits obtenus varient, de sorte que leur utilisation doit être parfaitement contrôlée. L'utilisation d'une alpha-amylase issue d'une bactérie thermostable permet de réaliser l'hydrolyse de l'amidon en une seule étape. Toutefois, on ne dispose pas encore d'enzyme assurant le passage de l'amidon au glucose.

Industrie pharmaceutique

L'utilisation des enzymes pour la synthèse de composés chimiques stéréoisomériques (deux stéréoisomères sont l'image l'un de l'autre dans un miroir) est souvent plus aisée et plus économique par voie enzymatique que par voie chimique, malgré les progrès notables de la synthèse chimique. Deux stéréoisomères n'ont généralement pas la même activité biologique selon leur «sens», c'est-à-dire que les rendements de certaines réactions chimiques sont meilleurs avec l'une des deux molécules ; on cherche à produire le plus actif, et certaines enzymes favorisent la synthèse spécifique de l'un des deux stéréoisomères.

Traditionnellement, les enzymes ont surtout servi à dégrader les molécules de grande taille en molécules plus simples. Aujourd'hui on les utilise de plus en plus pour la synthèse de molécules à activité biologique. Ces synthèses devraient être favorisées par l'utilisation d'enzymes issues d'extrémophiles, qui résisteraient, notamment à la présence de grandes quantités de solvant organique.

Ainsi, des enzymes interviennent dans la synthèse d'un intermédiaire essentiel de la production de nombreux antibiotiques, l'acide 6-aminopénicillanique. La synthèse chimique nécessite trois étapes qui mettent en œuvre des réactifs toxiques et nécessitent des conditions réactionnelles drastiques. Au contraire, la bioconversion se fait en une seule étape, dans des conditions réactionnelles douces. La conversion enzymatique a remplacé la synthèse chimique dans la synthèse de l'acide 6-aminopénicillanique.



pas présentes sous forme active dans le produit fini.

Les différentes enzymes utilisées dans l'industrie des détergents sont les protéases, qui éliminent les taches dues aux protéines, par exemple les taches d'œuf; les lipases, qui enlèvent les taches d'huile; les amylases qui dégradent les substances amylacées (pommes de terre, pâtes), et les cellulases. Ces dernières assurent un biopolissage qui améliore la qualité du coton et des autres fibres naturelles cellulosiques. Elles donnent un aspect lisse et lustré aux tissus. En effet, à l'usage, les fibres de surface des vêtements deviennent cassantes et forment de petites pilosités, qui donnent un aspect pelucheux. Les cellulases (qui, nous l'avons indiqué, hydrolysent les extrémités des fibres cellulosiques) utilisées dans les détergents éliminent les microfibrilles de surface, assouplissent les tissus et avivent les couleurs (en éliminant les fibrilles endommagées et décolorées).

L'utilisation des enzymes dans les détergents pose de nombreuses difficultés techniques. Elles doivent résister à de notables variations de l'acidité du milieu, à des concentrations ioniques variables et aux divers additifs, notamment les substances tensioactives qui évitent aux salissures de se redéposer sur le tissu propre. Les lessives domestiques liquides posent des difficultés supplémentaires, car les enzymes y sont moins stables que dans les lessives en poudre: en milieu liquide, elles risquent de perdre partiellement leur stabilité et, par conséquent, leur activité, tandis que dans les lessives en poudre, elles ne deviennent actives qu'au moment de la dissolution de la poudre.

Ainsi, depuis mai 1997, la Société Genencor International commercialise Puradax HA, un nouvel additif pour les détergents, dont le composé principal est une cellulase extraite d'un extrêmophile: elle a une forte activité catalytique lors du nettoyage des vête-

ments à un pH supérieur ou égal à 10. Cette cellulase provient de lagons alcalins situés au milieu des montagnes, dans un pays dont les découvreurs taisent le nom.

L'intérêt des catalases

Sous la pression de l'opinion publique qui réclame une industrie textile moins polluante, les industriels essaient de substituer les agents de blanchiment à base de chlore par le peroxyde d'hydrogène (l'eau oxygénée). Après l'opération de blanchiment, l'excès de peroxyde d'hydrogène est éliminé des bains et des effluents grâce à des catalases, des enzymes qui dégradent ce composé en eau et en oxygène. De surcroît, comme elles libèrent de l'eau, les catalases réduisent les besoins en eau dans les étapes ultérieures (de teinture, par exemple). Les enzymes utilisées dans ce procédé doivent être stables à des températures élevées et en milieu basique, et résister au peroxyde d'hydrogène, très réactif.

Ainsi, les extrêmophiles, capables de résister à des conditions physico-chimiques extrêmes, constituent une nouvelle source de molécules intéressantes pour l'industrie. Aujourd'hui, seules quelques unes sont utilisées dans des procédés industriels, dans le secteur de la biologie moléculaire, dans celui de la papeterie ou dans celui des détergents. Lorsque des enzymes naturelles sont utilisées dans des applications industrielles, comme catalyseurs pour des synthèses chimiques ou comme additifs dans des détergents, elles ne sont pas toujours très bien adaptées à leur tâche, car les substrats ne sont pas assez solubles, ou que les produits sont instables, ou encore en raison de réactions chimiques «parasites» qui entrent en compétition avec la réaction principale.

Ainsi, les enzymes qui interviennent dans certaines voies biochi-

4. LES CELLULASES éliminent les «peluches», sur les vêtements. À mesure que les tissus s'usent (a à c), les fibres de surface se détachent et s'effritent; «digérées» par les enzymes, elles se détachent et sont éliminées au lavage (d).

miques sont souvent inhibées par leurs propres substrats ou par les produits réactionnels, ces derniers agissant alors en limitant le rendement du procédé biocatalytique. Au contraire, les biotechnologies nécessitent des enzymes qui sont stables et actives sur de longues périodes et dans un environnement contraignant (solvant organique, par exemple). Les enzymes disponibles ne présentent généralement pas toutes les caractéristiques nécessaires à une application industrielle particulière et doivent être modifiées.

Malheureusement, on ignore, la plupart du temps, les relations entre la séquence protéique d'une enzyme, sa structure et sa fonction, condition pourtant indispensable à la modélisation rationnelle d'une protéine. En revanche, les techniques moléculaires permettent aux biologistes de réaliser des mutations dirigées *in vitro* sur des gènes clonés et de sélectionner ainsi les gènes et les molécules qu'ils codent, qui ont les caractéristiques recherchées. En continuant l'exploration de l'immense réservoir d'activité enzymatique enfoui au fond des océans et en utilisant les techniques d'ingénierie des protéines pour ajuster les propriétés des enzymes aux exigences industrielles, on disposera, dans quelques années, de catalyseurs enzymatiques qui faciliteront les réactions déjà connues et qui autoriseront des réactions nouvelles, qui restent à découvrir.

Yannick GUEGUEN, biochimiste, mène ses recherches dans le Laboratoire de biotechnologie des micro-organismes hydrothermaux, de l'IFREMER, à Brest, que dirige Jacques DIETRICH.

C. R. WOESE et al., *Towards a natural system of organisms: proposal for the domain Archaea, Bacteria and Eucarya*, in *Proc. Natl. Acad. Sci., USA*, vol. 87, pp. 4576-4579, 1990.

J. GUEZENNEC et J. DIETRICH, *Les micro-organismes extrêmophiles*, in *La science au présent: 2000*, coll. Biotechnologies, Éditions Encyclopedia Universalis, 1999.