

Les enzymes utilisées en routine dans les procédés industriels présentent des limites, car elles sont fragiles : elles ne sont actives que dans des zones de température ou de pH très limitées ; elles sont inactivées par divers solvants et dès que la salinité est trop élevée. Ainsi certaines réactions enzymatiques sont interdites. On recherche donc des enzymes plus résistantes et, dans ce cadre, les micro-organismes de l'extrême sont une source potentielle d'enzymes plus performantes : dans certains procédés industriels, les enzymes de l'extrême se substituent à leurs homologues classiques.

Elles sont plus faciles à conserver et à utiliser, elles permettent de réduire le nombre d'étapes des procédés, et d'augmenter la productivité sans risques pour l'environnement : actives dans des conditions extrêmes, ces enzymes résistent mieux aux conditions imposées par certains procédés de synthèse chimique. De surcroît, la résistance de ces enzymes leur ouvre des domaines d'application interdits aux enzymes usuelles. Les producteurs d'enzymes disposent désormais de toute une panoplie de molécules extrémophiles et commencent à diversifier les domaines d'application de ces enzymes dans l'industrie.

La recherche de nouvelles sources de micro-organismes et d'enzymes a un intérêt économique indéniable. Le marché mondial des enzymes industrielles, estimé à plus de deux milliards de francs en 1983, était de l'ordre de six milliard de francs en 1995 et atteindra vraisemblablement 12 milliards de francs en 2005.

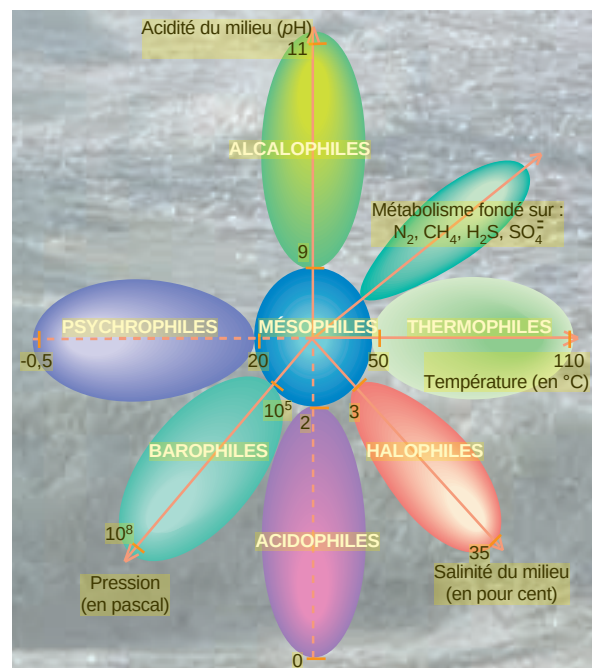
Les enzymes sont utilisées dans de nombreux secteurs de l'industrie : l'industrie des détergents, les industries alimentaires (industrie laitière, brasseries, production de jus de fruits, d'huiles, d'arômes), l'industrie de la pâte à papier, les secteurs de la pharmacie, de la cosmétique, de la chimie fine, sans oublier l'industrie textile.

En effet, les enzymes sont de plus en plus utilisées dans le traitement des textiles, notamment dans le finissage des tissus et des vêtements. Pour que les fibres textiles soient plus résistantes et qu'elles ne se rompent pas pendant le tissage, elles sont généralement encollées, c'est-à-dire enduites avec de l'amidon. Après le tissage, l'amidon doit être éliminé pour que les teintures et les impressions prennent sur le tissu.

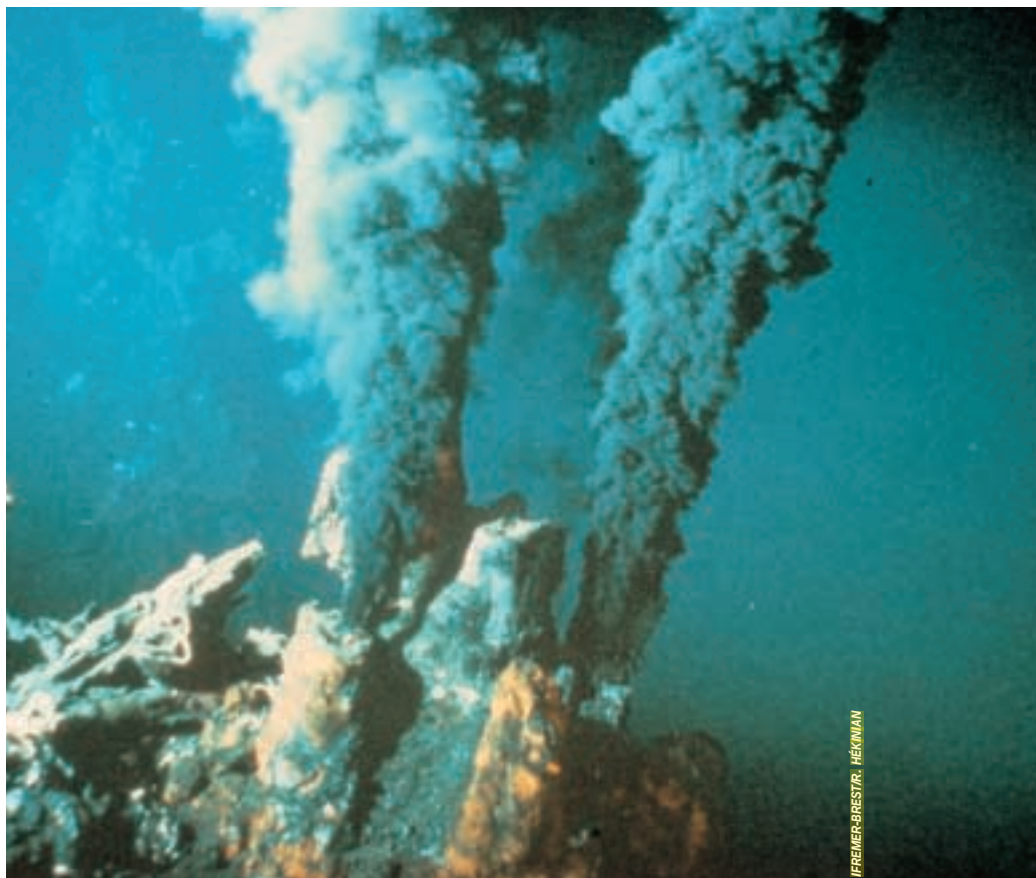
Cette opération peut être effectuée par un traitement du tissu avec des produits chimiques puissants, tels des acides, des bases ou des agents oxydants. Depuis plusieurs années, les enzymes nommées amylases sont utilisées en raison de leur efficacité et de leur spécificité : elles éliminent complètement l'apprêt d'amidon, sans aucun effet indésirable sur le vêtement.

Les amylases catalysent la réaction d'hydrolyse de l'amidon : parce qu'elles diminuent l'énergie qu'il faut fournir au système pour que la réaction ait lieu, elles facilitent la réaction de désencollage et l'accélèrent. Jusqu'à présent, on utilisait des amylases bactériennes classiques ; les amylases thermorésistantes réduisent la durée de l'étape d'hydrolyse de l'amidon à moins d'une minute, tandis qu'il faut une à quatre heures avec les autres amylases.

Le délavage des jeans est une autre application des enzymes. De nombreux vêtements subissent un lavage qui leur confère un aspect légèrement usé. Récemment encore, on préparait les jeans



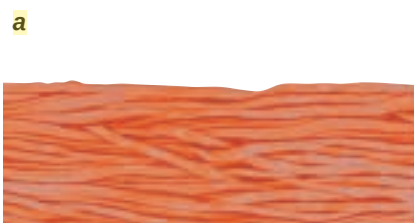
2. LES CONDITIONS de vie (température, pression, etc.) des bactéries extrémophiles ont été rassemblées sur ce schéma, où figurent, au centre, les bactéries usuelles, dites mésophiles.



3. AU VOISINAGE DES SOURCES CHAUDES, les micro-organismes pullulent. Leur métabolisme est assuré par des enzymes qui résistent à des conditions extrêmes de température et de pression. Ces enzymes résistent mieux que les enzymes classiques aux conditions physico-chimiques de divers procédés industriels.

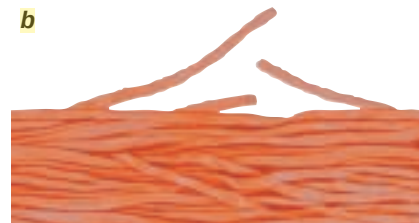
délavés en lavant les pantalons dans des machines chargées de pierres ponces, qui «usaient» le tissu.

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



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



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.