**III. Les enzymes**

**III.1. Généralités sur les enzymes industrielles**

Les enzymes sont des catalyseurs biologiques, principalement protéiques, qui accélèrent les réactions chimiques. Elles jouent un rôle essentiel dans de nombreuses fonctions biologiques et ont un large éventail d'applications industrielles. Elles sont nécessaires pour des réactions à des vitesses remarquables, même dans des conditions suboptimales (T°=37°C, pH=7). Leur demande a considérablement augmenté ces dernières années, notamment pour des enzymes telles que les cellulases, xylanases, lignines, pectinases et protéases, en raison de leur utilisation dans diverses industries.

Les enzymes peuvent être extraites de végétaux, d'animaux ou produites par des microorganismes, et sont reconnues pour leur efficacité et spécificité, ce qui permet d'effectuer des transformations chimiques de manière plus respectueuse de l'environnement.

**III.2. Utilisation des enzymes**

Les enzymes sont utilisées dans divers secteurs industriels :

* **Agroalimentaire** :
  + **Amylase** : Dégradation de l’amidon (glucose), accélération de l’activité de levure pour la production du pain, et conversion de l'amidon en sirop sucré.
  + **Cellulase et pectinase** : Utilisées pour la clarification des jus de fruits, en particulier pour la dégradation de la pectine dans les jus de fruits et vins.
* **Industrie pharmaceutique et cosmétique** : Production d'antibiotiques, de vitamines et d'autres produits utilisés dans les crèmes et cosmétiques.
* **Industrie biomédicale** : Production de protéines recombinantes, réactifs, et d'autres produits pour des applications médicales.
* **Industries de nettoyage et décontamination** : Utilisation dans les détergents pour dégradation des taches de graisse, et traitement de l'eau et des surfaces.

**III.4. Choix des microorganismes producteurs d'enzymes**

Les microorganismes producteurs d'enzymes doivent répondre à plusieurs critères pour être efficaces en production industrielle :

* **Rendement élevé** : Les microorganismes doivent produire une quantité importante d'enzymes en un minimum de temps.
* **Enzymes exo-cellulaires préférées** : Les enzymes exo-cellulaires (comme les hydrolases) sont généralement préférées car leur extraction est plus facile que celle des enzymes endo-cellulaires.
* **Facilité de culture** : Les microorganismes doivent pouvoir se développer sur des substrats peu coûteux.
* **Non-pathogénicité** : Les souches utilisées doivent être non pathogènes pour éviter tout risque pour la santé.

**III.5. Milieux de production des enzymes**

Les milieux de production doivent être complets, apportant tous les éléments nutritifs nécessaires à la croissance des microorganismes, comme des sources de carbone, azote, phosphore, oligoéléments, et vitamines. Des substrats spécifiques doivent être ajoutés pour la production d'enzymes particulières, par exemple :

* **Amidon** pour la production de l'α-amylase.
* **Cellulose** pour la production de la cellulase.

**III.6. Méthodes d'extraction et de purification des enzymes**

Une fois produites, les enzymes peuvent être excrétées dans le milieu de culture (enzymes exo-cellulaires) ou être présentes à l'intérieur des cellules (enzymes endo-cellulaires), et les méthodes de récupération et de purification varient en fonction de leur localisation et du degré de pureté requis.

**1) Extraction**

L'extraction des enzymes consiste à séparer l'enzyme de son environnement (extraction physique ou chimique). Pour extraire les enzymes intracellulaires, des méthodes telles que la lyse des cellules sont nécessaires, par exemple, par haute pression ou l'utilisation de perles de verre ou de solvants organiques.

**2) Purification**

La purification consiste à éliminer les impuretés de l'extrait brut pour obtenir un produit de haute qualité, particulièrement pour les enzymes destinées à des applications médicales. Cela peut inclure des techniques comme :

* **Cristallisation**
* **Électrophorèse**
* **Chromatographie**

**Étapes de purification**

* **Élimination des débris cellulaires** : Par filtration ou centrifugation.
* **Précipitation des acides nucléiques** : Par l'ajout de polyamines ou de polyéthylèneimine.
* **Précipitation enzymatique** : Par l'utilisation de sels (comme le sulfate d'ammonium) ou de solvants organiques tels que l'éthanol et l’acétone.

Ces étapes permettent d’obtenir des enzymes purifiées adaptées à diverses applications industrielles.



**Figure 24:** Etapes d'extraction et de purification des enzymes

**IV. Production des Organismes Unicellulaires (POU) ou Protéines Unicellulaires (SCP)**

Dans le domaine industriel, les micro-organismes sont utilisés sous forme de cellules complètes ou par extraction de leurs composants cellulaires. Ces dernières années, la production de Protéines d'Organismes Unicellulaires (POU ou SCP pour *Single Cell Protein*) à partir de divers substrats a fait l'objet d'une recherche intensive. Les POU désignent des biomasses riches en protéines, obtenues par fermentation microbienne (levures, bactéries, champignons filamenteux) sur des substrats organiques simples, comme les hydrocarbures, les paraffines, les sucres ou l'amidon hydrolysé.

**IV.1. Intérêt de la Production des POU**

* **Coût de Production Réduit** : La production des POU est économiquement avantageuse.
* **Riche en Protéines et en Acides Aminés Essentiels** : Les POU sont particulièrement nutritives, ce qui les rend précieuses dans l'industrie alimentaire.
* **Riche en Fibres Alimentaires** : Les POU constituent une bonne source de fibres.
* **Faible Teneur en Graisses** : Les produits à base de POU contiennent généralement très peu de graisses.

**IV.2. Production des Levures**

Certains micro-organismes sont eux-mêmes des produits industriels. Actuellement, une dizaine de levures sont fabriquées pour diverses industries, avec *Saccharomyces cerevisiae* comme la plus utilisée, notamment dans la vinification, la panification, la fabrication de bière et la production de levure de boulanger. Ces levures sont cultivées dans de grandes cuves de fermentation aérées contenant des milieux à base de mélasse, riches en sucres qui servent de source de carbone et d’énergie. Le milieu est également enrichi en minéraux, vitamines et acides aminés nécessaires à leur multiplication, ainsi qu’en phosphore (acide phosphorique) et en azote et soufre (sulfate d’ammonium). Les volumes de fermenteurs utilisés peuvent varier de 40 000 à 200 000 litres.

**IV.2.1. Objectifs de la Production de la Levure**

La production industrielle des cellules de levure vise deux principaux objectifs :

1. **Objectif Qualitatif** : Sélectionner une souche qui répond aux critères suivants :
   * Capacité fermentative élevée.
   * Grande stabilité.
   * Produit final adapté aux besoins du client (ex. : levure pour panification, vinification, levure pressée ou sèche).
2. **Objectif Économique** : Obtenir la qualité souhaitée au coût le plus bas possible.

**IV.2.2. Étapes de la Production des Levures**

La production industrielle de levure par voie microbiologique doit tenir compte des quatre éléments suivants :

* Le milieu de culture.
* L’inoculum.
* Le bioréacteur.
* La séparation et la purification.

Les étapes de production incluent :

1. Préparer l’inoculum en ensemencant la levure pure en tubes.
2. Propager l’inoculum dans des fermenteurs de tailles croissantes, depuis le tube à essai initial jusqu’au fermenteur commercial.
3. Ensemencer le fermenteur avec la levure et ajuster chaque paramètre de fermentation (mélasse, sels nutritifs, apport d’air, température, pH) pour garantir une croissance optimale et une haute productivité.
4. À la fin du processus, le contenu du fermenteur contient environ 4 % de levures solides, recueillies par des décanteuses continues.
5. Centrifuger les cellules jusqu’à ce qu’elles deviennent de couleur claire.
6. Presser la levure pour former des blocs vendus sous forme sèche (durée de conservation prolongée) dans les supermarchés pour la fabrication de pain et de pâtisseries.
7. La levure diététique est stérilisée, séchée à l’air, et vendue comme complément alimentaire, riche en vitamine B et en protéines, pouvant être ajoutée à la farine de blé pour en augmenter la valeur nutritionnelle.

