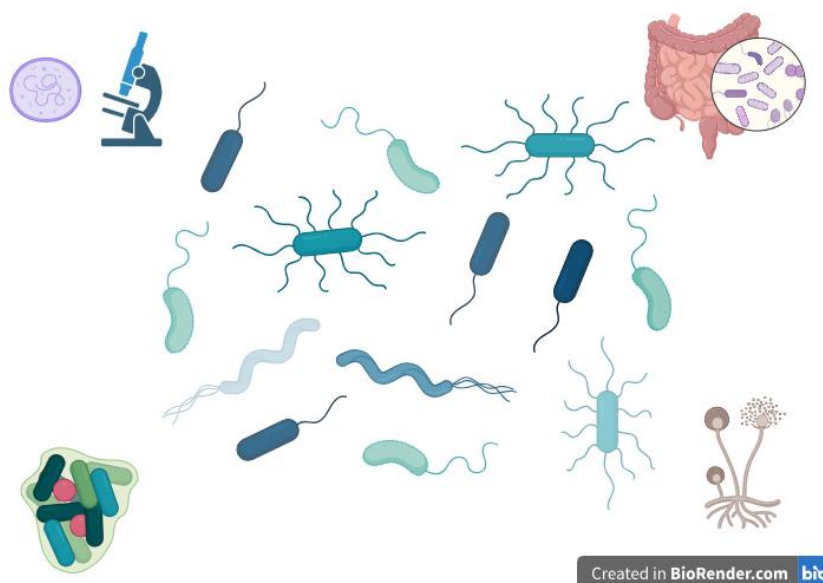


CULTURES DE MICROORGANISMES

LES MICROBES EN MISSION : NOURRIR, PURIFIER ET PROTÉGER



Created in BioRender.com bio

DEBONGNIE Lucie, FINDIK Iklim, HUAMANI CASTILLO Elizabeth, KHEDHIRI Maissa, LAAROUSSI Hoda, MARTINS Sara

Superviseur : HERMANS Christian



ÉCOLE DE **BIOINGÉNIERIE**
DE BRUXELLES
ENVIRONNEMENT - BIOINDUSTRIES - AGRICULTURE

Table des matières

Résumé.....	3
Abstract.....	4
1. Introduction.....	5
1.1 Que sont les microorganismes ?.....	5
1.2 Quand les microorganismes ont-ils été découverts ?	5
1.3 Microorganismes ou microbes, quelle différence ?	5
1.4 Que sont les biotechnologies ?	6
2. Biotechnologies jaunes : Environnement	7
2.1 Effets des pesticides sur les microorganismes du sol.....	7
2.1.1 Mise en contexte	7
2.1.2 Les pesticides.....	7
2.2 La bioremédiation des sols par les biofilms	8
2.2.1 Formation des biofilms	8
2.2.2 Communication et transfert de gènes dans les biofilms.....	9
2.2.3 Bioremédiation.....	10
3. Biotechnologies vertes : Agriculture	12
3.1 Le compost.....	12
3.1.1 Qu'est-ce qu'un compost ?.....	12
3.1.2 La composition du compost.....	12
3.1.3 Le humus, quel lien avec le compost ?	12
3.1.4 Le compost à chaud, en quoi ça consiste ?	12
3.1.5 Qu'est-ce que le rapport C/N et pourquoi est-il important pour les microorganismes ?	13
3.2 L'utilisation des OGM en agriculture	14
3.3 Les biostimulants	15
3.3.1 Qu'est-ce qu'un biostimulant ?	15
3.3.2 Comment un biostimulant améliore-t-il la plante ?	15
3.3.3 Rôle des biostimulants, exemple.....	16
4. Biotechnologie verte : Industrie agro-alimentaire	17
4.1 La fermentation	17
4.1.1 Qu'est-ce que la fermentation ?	17
4.1.2 Fermentation pour l'ensilage	17
4.1.3 Fermentation à destination alimentaire	18
4.1.4 Fermentation du yaourt	18
4.1.5 Fermentation de la bière.....	19
4.1.6 Fermentation du kombucha.....	19
5. Biotechnologies rouges : Santé.....	20
5.1 Les microorganismes probiotiques.....	20
5.1.1 Définitions et effets sur la santé	20
5.1.2 Risques, limites et précautions.....	21
5.2 Le microbiote	21

5.2.1 Le microbiote intestinal, de quoi s'agit-il ?	21
5.2.2 Comment les habitudes de vie affectent-elles l'équilibre du microbiote intestinal ?	22
5.3 Les OGM et la production de l'insuline	24
5.3.1 Qu'est-ce que l'insuline ? À quoi sert-elle ?	24
5.3.2 Avant l'arrivée des OGM	24
5.3.3 Origine des OGM	24
5.3.4 Début des travaux	25
5.3.5 Comment cette insuline recombinante est-elle fabriquée ?	25
5.3.6 Quels sont les avantages de ce progrès ?	25
5.3.7 Les OGMs, un véritable sujet de débat ?	26
6. Mots croisés	27
7. Glossaire	28
8. Références	31
8.1 Bibliographie :	31
8.2 Webographie :	34

Résumé

Les microorganismes, ou microbes, jouent un rôle essentiel dans de nombreux processus biologiques liés à l'environnement, à l'agriculture, à l'alimentation et à la santé. Bien qu'ils soient invisibles à l'œil nu et souvent associés aux maladies, ils participent à des fonctions importantes comme le recyclage de la matière organique, la production alimentaire et le maintien de l'équilibre du microbiote intestinal. Dans les sols, ils contribuent aux cycles des nutriments et à la fertilité en décomposant la matière organique, mais l'utilisation intensive de pesticides peut perturber ces communautés microbiennes. Certains microorganismes sont également utilisés en bioremédiation pour dégrader ou immobiliser des polluants, souvent sous forme de biofilms. En agriculture, ils interviennent dans le compostage, où ils transforment les déchets organiques en amendement pour les sols. Les biotechnologies agricoles incluent aussi les organismes génétiquement modifiés (OGMs) et les biostimulants microbiens capables d'améliorer la croissance des plantes. Les microorganismes sont également utilisés dans les procédés de fermentation pour transformer et conserver des aliments comme le yaourt, la bière ou le kombucha. Dans le domaine de la santé, le microbiote intestinal participe à la digestion, au métabolisme et au fonctionnement du système immunitaire.

Abstract

Microorganisms, or microbes, play an essential role in many biological processes related to the environment, agriculture, food production and health. Although invisible to the naked eye and often associated with diseases, they contribute to important functions such as organic matter recycling, food production and the maintenance of intestinal microbiota balance. In soils, microorganisms participate in nutrient cycles and soil fertility by decomposing organic matter, but intensive pesticide use can disrupt these microbial communities. Some microorganisms are also used in bioremediation to degrade or immobilize pollutants, often forming biofilms. In agriculture, microorganisms are involved in composting, where they transform organic waste into a soil amendment. Agricultural biotechnologies also include genetically modified organisms (GMOs) and microbial biostimulants that can improve plant growth. Microorganisms are widely used in fermentation processes that transform and preserve food, such as yogurt, beer and kombucha. In the health field, the intestinal microbiota contributes to digestion, metabolism and immune system functioning.

1.Introduction

Certains organismes, pourtant méconnus en dehors de la sphère scientifique, font de plus en plus parler d'eux dans les médias et sur les réseaux sociaux.

Kombucha, kimchi, compost, OGM ou encore dégradation de polluants : des sujets tendances et/ ou polémiques tous très différents. Toutefois, ils ont tous un point en commun : les microorganismes.

1.1 Que sont les microorganismes ?

L'étymologie du mot « microorganisme » renvoie aux mots grecs « μικρός » signifiant « petit » et « ὄργανον » signifiant « organe ». En effet, les microorganismes regroupent les organismes unicellulaires invisibles à l'œil nu, c'est-à-dire qu'ils ne sont observables qu'à l'aide d'un microscope.

Ils comprennent alors une panoplie d'organismes, dont nous pouvons distinguer six catégories : les bactéries, les archées, les champignons (mycètes), les (micro-)algues, les protozoaires et les virus.

Ces organismes, pourtant invisibles, représentent une immense partie de la biodiversité sur Terre. Ils sont omniprésents et nécessaires au bon fonctionnement de tous les êtres-vivants.

1.2 Quand les microorganismes ont-ils été découverts ?

Bien que des références à des êtres invisibles existent depuis l'Antiquité, leur nature est restée hypothétique jusqu'à l'invention du microscope. Au XVII^e siècle, Antoni van Leeuwenhoek fut le premier à observer des microorganismes, marquant le point de départ de la microbiologie dont il est considéré comme le précurseur.

1.3 Microorganismes ou microbes, quelle différence ?

Les microorganismes sont aussi appelés microbes dans le langage courant. Ce mot a été introduit pour la première fois en 1878 par le chirurgien Charles-Emmanuel Sédillot afin de qualifier les êtres vivants de très petites tailles.

Néanmoins, le mot « microbe » a une connotation plutôt péjorative de nos jours. Ceci s'explique par le fait que les premiers microorganismes découverts et principalement étudiés dans le courant du XIX^e siècle étaient des microbes pathogènes ou parasites, notamment avec la publication de la « théorie microbienne » à la même période, dont l'un des auteurs est Louis Pasteur. Il explique que les microorganismes sont à l'origine de nombreuses maladies. Depuis cela, les microbes pathogènes semblent avoir marqué les esprits, ne laissant pas la place aux bienfaits de nombreux autres microbes.

C'est pour cela que nous rencontrerons plus souvent le mot microorganisme dans la littérature scientifique, sa connotation étant plus neutre.

Les microorganismes sont-ils tous nuisibles ?

Malgré les idées reçues, tous les microorganismes ne sont pas pathogènes et certains sont même bénéfiques pour notre santé. Nous pouvons en retrouver dans tous les secteurs qui nous entourent, en particulier dans les biotechnologies.

1.4 Que sont les biotechnologies ?

Les biotechnologies regroupent un ensemble des techniques qui utilisent des êtres vivants, des cellules ou des molécules du vivant pour produire des biens ou des services utiles à l'être humain.

Ces biotechnologies s'appliquent à des secteurs particuliers, dont chacun correspond à une couleur : le jaune pour la protection de l'environnement, le vert pour le végétal, le rouge pour la santé, le blanc pour l'application industrielle et le bleu pour la vie et la biodiversité marine.

Dans ce portfolio, nous allons nous baser sur ces différentes biotechnologies afin d'illustrer les applications diverses et variées des microorganismes, et casser les idées reçues concernant ceux-ci.

Nous nous concentrerons précisément sur les secteurs suivants : l'environnement (jaune), l'agriculture et l'industrie agro-alimentaire (vert), ainsi que la santé (rouge).

2. Biotechnologies jaunes : Environnement

Les biotechnologies jaunes regroupent l'ensemble des technologies mobilisées au service de l'environnement, telles que la décontamination des sites pollués ou le traitement des eaux usées. Les sols agricoles sont particulièrement exposés à diverses sources de contamination. Les polluants dont l'on entend le plus parler sont les pesticides. Ces composés peuvent altérer la structure et la diversité du microbiote du sol et affecter la fertilité à long terme.

Les biotechnologies jaunes permettent de limiter ces impacts en mobilisant des organismes vivants (plantes ou microorganismes) capables de transformer, immobiliser ou dégrader les molécules polluantes. Dans cette partie, nous analyserons d'abord les effets des pesticides sur le microbiote du sol, puis nous présenterons un exemple de biotechnologie jaune, la bioremédiation : l'utilisation des biofilms pour favoriser la dégradation des contaminants.

2.1 Effets des pesticides sur les microorganismes du sol

2.1.1 Mise en contexte

Le sol, un milieu actif et dynamique :

Bien plus qu'un simple point d'ancrage et substrat pour les plantes, le sol constitue un écosystème vivant complexe et dynamique abritant une grande variété de microorganismes tels que les bactéries, champignons, protozoaires, algues et virus qui interagissent constamment et qui forment le microbiote du sol (Prashar & Shah, 2016).

Le microbiote, une communauté qui se complète :

Le microbiote s'organise en réseaux trophiques structurés où chaque microorganisme a un rôle différent et particulier, ce qui fait d'eux une communauté organisée dont les membres se complètent dans leurs tâches.

Les bactéries, microorganismes les plus abondants dans le sol, sont les principaux décomposeurs de la matière organique assurant entre autres le recyclage des nutriments (Prashar & Shah, 2016). Elles participent également au cycle de l'azote, essentiel à la croissance des plantes et à la vie du sol. La structure mycélienne des champignons représente une part importante de la biomasse microbienne et joue aussi un rôle clé dans la décomposition de la matière organique et le recyclage des nutriments (Prashar & Shah, 2016).

2.1.2 Les pesticides

C'est quoi, un pesticide ? :

Les pesticides regroupent un ensemble de composés chimiques biologiquement actifs qui ont été conçus dans le but d'éliminer différentes espèces végétales, animales et fongiques. Ils sont essentiellement toxiques (Roman et al., 2021). Même s'ils sont majoritairement utilisés en agriculture et dans les jardins privés, certaines industries les emploient afin de limiter le développement des algues dans l'eau et d'éliminer les plantes invasives (Roman et al., 2021). Les pesticides sont donc devenus un élément central dans l'agriculture actuelle, assurant la protection des cultures et le maintien d'un rendement élevé.

Le devenir des pesticides et leur persistance dans le sol :

Une fois les pesticides appliqués, ils ne restent pas exclusivement dans la partie traitée. Ils se propagent selon différentes voies dans l'environnement. Une partie se volatilise vers

l'atmosphère ou est entraînée vers les eaux souterraines après les pluies ou l'irrigation, tandis qu'une autre persiste dans le sol (Roman et al., 2021).

La persistance d'un pesticide va dépendre des caractéristiques du sol comme par exemple la teneur en matière organique et en argile, le type de sol, le pH et la diversité des microorganismes ou encore leurs propriétés propres tels que leur volatilité, leur structure chimique et leur solubilité. Elle dépend aussi des conditions environnementales, notamment la température et l'exposition aux UV. Certains pesticides vont donc disparaître rapidement contrairement à d'autres qui vont rester plus longtemps, ce qui engendrera une accumulation progressive dans les sols agricoles (Roman et al., 2021).

Cette accumulation amène à s'intéresser aux effets des pesticides sur le microbiote du sol.

Effet immédiat des pesticides sur la biomasse, les activités et la diversité microbienne :

Les microorganismes sont parmi les premiers affectés lorsque des pesticides contaminent le sol. Les résidus s'accumulent et perturbent les communautés microbiennes. Par exemple, une dose élevée de pesticides organophosphatés méthamidophos réduit la biomasse microbienne tout en stimulant l'activité catalytique de certains groupes bactériens (Prashar & Shah, 2016). D'autres herbicides comme l'atrazine entraînent également une baisse de biomasse (Prashar & Shah, 2016).

Par ailleurs, l'application de pesticides peut mener à une augmentation de la biomasse microbienne totale. Cette hausse s'explique par la multiplication de quelques microorganismes résistants, mais elle s'accompagne d'une réduction de la diversité fonctionnelle assurée par le microbiote dû à la diminution ou à la disparition de certains groupes de microorganismes sensibles, ce qui perturbe l'équilibre du sol (Prashar & Shah, 2016).

Cette altération au niveau de la communauté microbienne va se répercuter sur le fonctionnement global du sol comme les enzymes ou encore le cycle des nutriments.

2.2 La bioremédiation des sols par les biofilms

Un biofilm est un ensemble de microorganismes, d'une même espèce ou de plusieurs espèces différentes, fixés à une surface et entourés d'une matrice de polymères extracellulaires (EPS). Cette matrice est produite par les microorganismes eux même et leur sert notamment de protection. La formation d'un biofilm confère aux microorganismes qui y résident une meilleure résistance aux stress environnementaux et leur permet de mieux capter les nutriments.

2.2.1 Formation des biofilms

Un biofilm se forme en trois grandes étapes. La première correspond à l'adhésion des microorganismes à une surface, où ils commencent à s'installer. Vient ensuite la phase de maturation, durant laquelle les cellules se multiplient, produisent davantage de polymères extracellulaires et forment une structure organisée. Enfin, une partie des microorganismes se disperse afin de coloniser de nouveaux milieux, c'est la phase de détachement. (Mishra et al., 2022). Ces différentes étapes sont illustrées à la figure 1 ci-dessous.

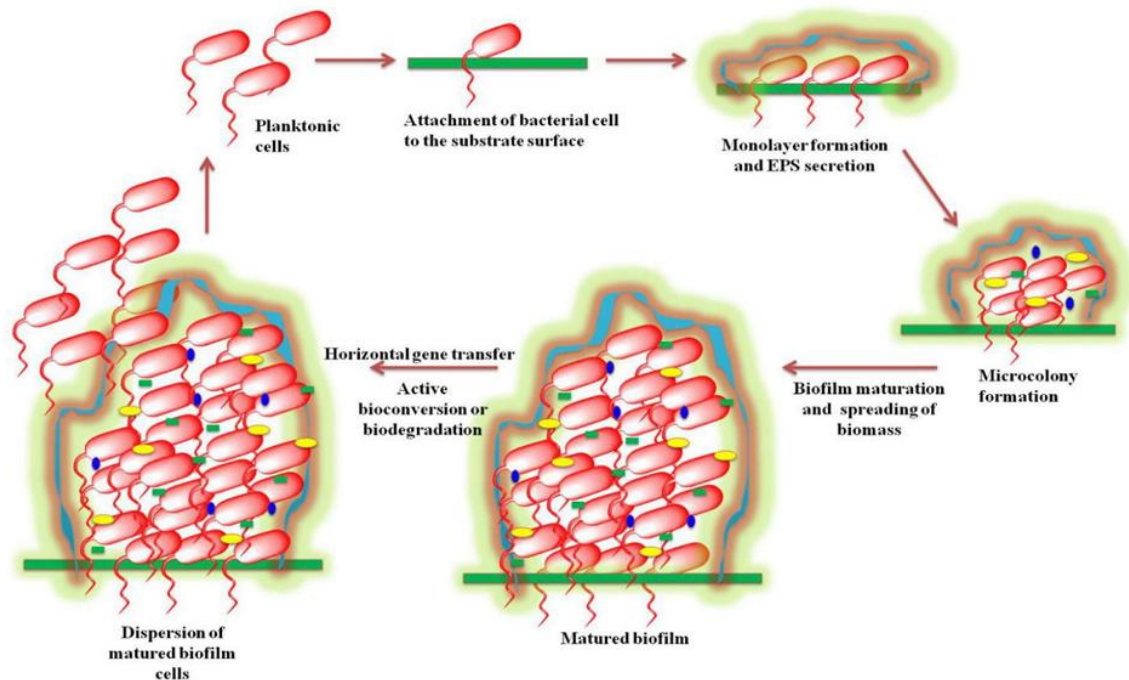


Figure 1 : Étapes de formation et de développement d'un biofilm : adhésion des cellules à une surface, formation d'une couche avec sécrétion d'EPS, formation de micro-colonies, maturation du biofilm et dispersion des cellules. Source : Mishra et al. (2022).

2.2.2 Communication et transfert de gènes dans les biofilms

Les microorganismes communiquent entre eux grâce à un système appelé « quorum sensing ». Cela leur permet de coordonner leur croissance et de construire des structures qui facilitent la circulation des nutriments à l'intérieur du biofilm. Le quorum sensing joue également un rôle important dans l'adhésion des microorganismes au substrat.

A l'intérieur d'un biofilm, les bactéries peuvent échanger du matériel génétique entre elles par différents mécanismes. Ce transfert de gènes peut se faire par transformation, lorsqu'une bactérie capte de l'ADN libre présent dans son environnement, par transduction, lorsque le transfert est assuré par un virus bactériophage, ou encore par conjugaison, quand deux bactéries échangent directement de l'ADN à la suite d'un contact direct.

Dans un biofilm, le phénomène de conjugaison est très fréquent car les bactéries du biofilm sont très proches les unes des autres. Cela favorise la transmission de gènes. Ces gènes peuvent donner de nouveaux avantages adaptatifs aux bactéries, tels qu'une résistance aux antibiotiques, une tolérance aux éléments traces métalliques ou encore la capacité à dégrader des molécules complexes, notamment des polluants. Cette dernière propriété peut être exploitée dans le cadre de la bioremédiation des sols et des eaux (Singh et al., 2006).

2.2.3 Bioremédiation

La bioremédiation désigne l'ensemble des procédés biologiques exploitant les capacités métaboliques de microorganismes, parfois associés à des plantes, afin de transformer, dégrader ou immobiliser des polluants présents dans les sols ou les eaux.

Par exemple, dans les sols contaminés par des hydrocarbures ou des pesticides, les microorganismes peuvent transformer ces composés en molécules plus simples, puis les minéraliser en CO_2 et H_2O en conditions aérobies, ou en CH_4 en conditions anaérobies (Haritash & Kaushik, 2009). Certaines bactéries possèdent des propriétés physiologiques particulières, comme la production de biosurfactants (molécules facilitant le contact entre l'eau et les substances hydrophobes) ou la chimiotaxie, c'est-à-dire la capacité à se déplacer vers une source de nutriments ou un polluant. Ces mécanismes augmentent la biodisponibilité des polluants et donc leur dégradation. (Megharaj et al., 2011)

La bioremédiation peut être réalisée *in situ* (directement sur le site contaminé) ou *ex situ* dans des bioréacteurs, où les conditions (pH, concentration en oxygène et température) sont contrôlées et optimisées afin de maximiser les résultats (Singh et al., 2006). Plusieurs mécanismes sont impliqués dans la bioremédiation, tels que la biosorption, où les polluants sont piégés par les polymères extracellulaires produits par les bactéries, la bioaccumulation, qui concentre les substances dans la biomasse microbienne, et la biominéralisation, qui transforme certains polluants en formes minérales plus stables et moins toxiques (voir Figure 2). Dans le cas des polluants organiques, les cellules peuvent se déplacer vers la source de contamination par chimiotaxie, et une fois en contact avec la surface du polluant, la formation du biofilm et la production de biosurfactants commencent, améliorant la biodisponibilité et la dégradation des composés hydrophobes (Gadd, 2010).

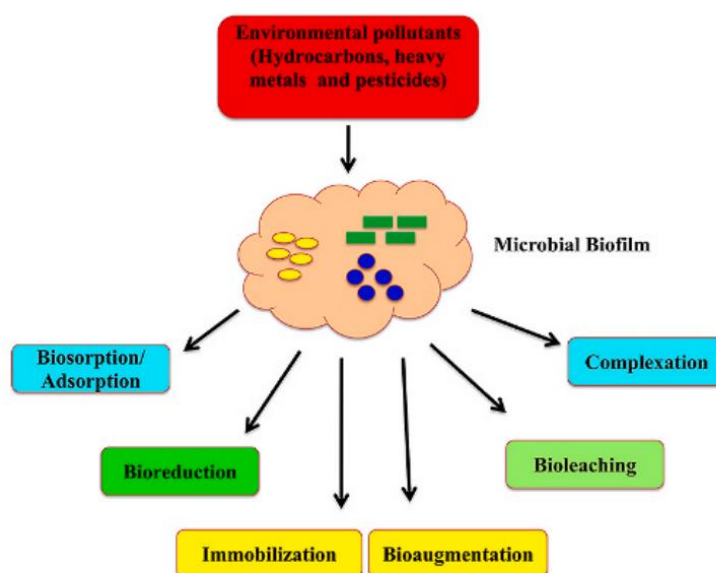


Figure 2 Mécanismes de la bioremédiation médiée par les biofilms. Les microorganismes organisés en biofilm dégradent ou immobilisent les polluants (hydrocarbures, pesticides, éléments traces métalliques) grâce à des processus tels que la biosorption et la biodégradation. Source : Mishra et al. (2022)

Par exemple, dans le cas des hydrocarbures aromatiques polycycliques (PAHs), la dégradation repose principalement sur l'activité de certaines bactéries capables d'utiliser ces composés comme source de carbone. Des bactéries telles que *Pseudomonas*, *Mycobacterium* ou encore *Rhodococcus* présenteraient une capacité à transformer ces molécules complexes en composés moins toxiques (Haritash & Kaushik, 2009). La dégradation débute généralement par l'action d'enzymes spécifiques, notamment les oxygénases, qui introduisent de l'oxygène dans la structure aromatique. Cette étape permet l'ouverture des cycles, formant ainsi des intermédiaires plus simples, qui seront transformés au fur et à mesure des réactions enzymatiques jusqu'à une minéralisation complète en dioxyde de carbone et en eau en condition aérobies (Haritash & Kaushik, 2009). Toutefois, la vitesse et l'efficacité de ce processus dépendent fortement des conditions environnementales, telles que la température, le pH, la disponibilité en oxygène ou encore la composition de la communauté microbienne présente dans le sol.

Limites de la bioremédiation

La bioremédiation présente des limites, en particulier lors d'applications *in situ* dans des écosystèmes complexes. Son efficacité dépend de nombreux facteurs environnementaux tels que le pH, la disponibilité en oxygène, la température, les nutriments ainsi que la présence d'inhibiteurs ou de co-contaminants. Ces paramètres sont difficiles à contrôler en conditions naturelles, cela peut entraîner une forte variabilité des résultats. De plus, certains polluants comme les pesticides ou les microplastiques, restent très résistants à la biodégradation. Ces approches demeurent donc largement expérimentales et nécessitent encore des études avant une mise en œuvre à grande échelle.

3. Biotechnologies vertes : Agriculture

Les biotechnologies vertes sont relatives au végétal, c'est-à-dire qu'elles regroupent l'ensemble des technologies appliquées au domaine agricole telles que l'amélioration génétique des plantes ou ce qui nous intéresse, l'utilisation de microorganismes en agriculture. Dans le point trois, nous allons nous concentrer sur quatre applications microbiennes : le compost, les organismes génétiquement modifiés (OGM), les biostimulant et enfin, la fermentation.

3.1 Le compost

Le mot compost provient de l'ancien français et signifie « mélange ». En effet, dans l'imaginaire collectif, on s'imaginerait bien un mélange de terre, vers et divers autres composants.

3.1.1 Qu'est-ce qu'un compost ?

Le compost est le produit obtenu après compostage, principalement utilisé comme amendement des sols agricoles. Le compostage consiste en la décomposition de déchets organiques par des décomposeurs (microbes, vers, etc.) afin d'obtenir un produit partiellement stable et valorisable.

A noter qu'un compost insuffisamment stabilisé peut être phytotoxique et nuire à la croissance des plantes (Lončarić et al., 2024). L'indice de germination (GI) mesure l'impact du compost sur la germination des graines : plus le GI est élevé, moins le compost est toxique.

3.1.2 La composition du compost

Il faut d'abord comprendre les notions de humus et de matière organique (MO). Le humus désigne la couche de terre superficielle d'un sol et provient de la décomposition de MO qui est réalisée par l'activité de microorganismes et macro-organismes présents dans ce sol. La MO désigne la matière créée par les décomposeurs du sol, qui sont des êtres vivants. Par exemple, nous pouvons y trouver des bactéries, des champignons, ou encore des végétaux.

3.1.3 Le humus, quel lien avec le compost ?

Le humus et le compost partagent le même processus de décomposition, mais il réside une différence clef : le humus est le produit final, il est stable et se forme après plusieurs mois dans le sol. Le compost n'est quant à lui que partiellement stable et continue d'évoluer, même après avoir été utilisé comme amendement pour le sol.

L'idéal, après avoir réalisé un compostage, est d'obtenir un compost proche de la texture et de la composition du humus.

3.1.4 Le compost à chaud, en quoi ça consiste ?

Le compostage à chaud consiste en trois phases successives : la phase mésophile, la phase thermophile et la phase de durcissement.

La première phase est caractérisée par une température variant entre 20°C et 40°C, permettant la prolifération de microorganismes mésophiles. Ceux-ci vont dégrader les sources

nutritives microbiennes déjà présentes ainsi que les sucres. Cette activité fait grimper la température au-delà de 40°C.

S'en suit la phase thermophile : les microorganismes prospérant entre 50°C et 75°C vont décomposer des MO en conditions aérobies. Si le milieu est trop sec, les microorganismes vont s'assécher et la décomposition s'arrêtera. Si le milieu est trop humide, nous entrerons dans des conditions d'anaérobie et l'activité microbienne sera considérablement ralentie. Il est donc important de maintenir une humidité suffisante, mais pas excessive. Après quelques semaines à quelques mois, nous obtenons un produit de type humus.

Ensuite, la phase de durcissement commence et les températures baissent jusqu'à atteindre des valeurs similaires à celles de la première phase, laissant place aux microorganismes mésophiles qui vont occuper la majeure partie du produit. Certains de ceux-ci ont des propriétés bénéfiques pour les plantes. Le produit obtenu pourra être utilisé sur les sols et stimuler la croissance de la plante ou la rendre plus résistante à des pathogènes (Brady et Wel, 2016).

Les vers de terre (figure 3) sont un exemple d'organisme qui participent, eux aussi, à la dégradation de MO avec les microorganismes.



Figure 3 : vers de terre, macro-organismes participant à la décomposition de la MO dans le compost. Source : [sippakorn/site unsplash](https://unsplash.com/photos/sippakorn)

3.1.5 Qu'est-ce que le rapport C/N et pourquoi est-il important pour les microorganismes ?

Le rapport C/N (rapport massique de carbone sur azote) est un outil de mesure de la vitesse de décomposition de la MO dans le sol. Un compost idéal a un rapport C/N situé entre 10/1 et 20/1 (Brady et Wel, 2016).

Pour cela, il est conseillé d'apporter 2/3 de matières vertes, donc de matières organiques (contenant de l'azote) pour 1/3 de matières brunes (contenant du carbone). Des exemples de matières azotées et carbonées se trouvent dans le tableau 1 ci-dessous.

Tableau 1 : Exemples de matières vertes et brunes du quotidien

Matières vertes	Matières brunes
Gazon tondu	Foin
Épluchures de fruits	Carton
Restes de légumes	Feuilles mortes

Respecter ce rapport C/N est primordial pour que les microorganismes mènent à bien le processus de décomposition et de minéralisation.

3.2 L'utilisation des OGM en agriculture

Les OGM, ou organismes génétiquement modifiés, comprennent tout organisme dont le matériel génétique a subi une modification qui ne se produit pas naturellement, ni par multiplication ni par recombinaison naturelle (Neiryck & Roch, 2010).

La production d'OGM appliquée aux plantes cultivées repose sur l'introduction contrôlée d'un transgène dans une cellule végétale via deux étapes (Oliver, 2014) :

- Transformation : il s'agit de l'insertion du gène d'intérêt dans une cellule végétale.
- Régénération : c'est l'étape de croissance d'une plante entière, issue de cette cellule.

Il existe actuellement plusieurs méthodes de création d'OGM pour améliorer le rendement agricole via les plantes ou le sol. Un important outil biotechnologique utilisé est la bactérie *Agrobacterium tumefaciens*. Elle est capable de transférer un fragment de son ADN, le T-DNA, dans le génome de la plante via son plasmide Ti.

La transformation par *A. tumefaciens* (Figure 4) est un processus naturel par lequel cette bactérie peut transférer une partie de son ADN dans le génome d'une plante. Lorsqu'une plante est blessée, elle libère des phénols que la bactérie détecte, ce qui lui permet de se diriger vers la zone blessée et d'activer des gènes nécessaires au transfert d'ADN. La bactérie s'attache ensuite à la cellule végétale et prépare un fragment spécifique de son ADN, appelé T-DNA, à partir de son plasmide Ti. Ce fragment est alors transféré dans la cellule végétale grâce à un système de transport spécialisé. Une fois à l'intérieur, le T-DNA est protégé par des protéines et transporté jusqu'au noyau, où il s'intègre dans l'ADN de la plante. Les gènes apportés par le T-DNA peuvent alors être exprimés par la cellule végétale (Guo et al., 2019).

Dans la nature, ce T-DNA est responsable d'une tumeur causant la galle du collet (maladie bactérienne). Cependant, il a été désarmé et remplacé par des gènes d'intérêt (Guo et al., 2019 ; Oliver, 2014). Cette méthode de transformation s'applique à de nombreuses plantes cultivées (maïs, tomate, riz, ...) pour accroître la résistance à des stress biotiques et abiotiques ou la qualité nutritionnelle (Ziemienowicz, 2014).

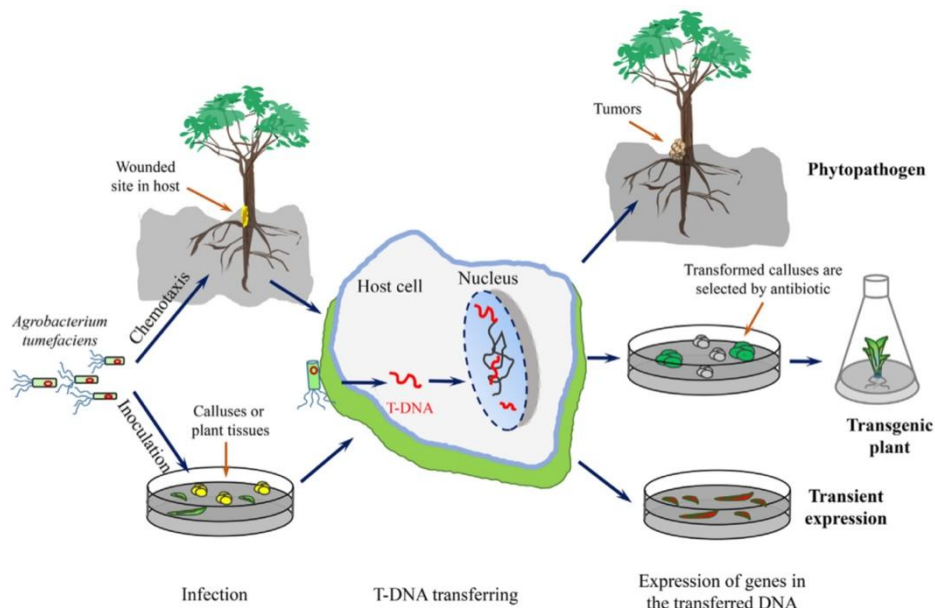


Figure 4 : Aperçu schématique de l'infection naturelle et de la transformation artificielle de l'hôte par *Agrobacterium tumefaciens*. Par infection naturelle, *A. tumefaciens* migre vers la blessure de la plante par chimiotaxie. La bactérie entre en contact avec la cellule hôte végétale puis injecte son T-DNA. Par transformation artificielle, l'inoculation de cette bactérie se fait sur des tissus de plantes ou des calles en culture. Les cellules transformées sont sélectionnées par des antibiotiques soit pour une transformation stable, soit pour une expression transitoire. Source : Guo et al. (2019)

3.3 Les biostimulants

3.3.1 Qu'est-ce qu'un biostimulant ?

Un biostimulant est une substance ou un microorganisme appliqué à la plante dans le but d'améliorer l'efficacité de la nutrition, la tolérance aux stress abiotiques, la qualité de la culture, indépendamment des nutriments qu'elle contient (Du Jardin, 2015).

En d'autres termes, les biostimulants seraient pour les plantes, les analogues des vitamines que nous prenons pour mieux résister à un rhume, par exemple.

Les biostimulants constitués de microorganismes peuvent contenir : des rhizobactéries favorisant la croissance des plantes (PGPR = plant-growth-promoting rhizobacteria), des champignons mycorhizes arbusculaires (AMF = arbuscular mycorrhizae fungi), des champignons non pathogènes, des protozoaires, ainsi que des nématodes (Sun & Shahrajabian, 2023).

3.3.2 Comment un biostimulant améliore-t-il la plante ?

Pour comprendre comment un biostimulant influence la croissance de la plante, il faut savoir quels éléments participent à cette croissance : les nutriments.

17 nutriments sont essentiels au développement et à la croissance de la plante, dont :

- Trois éléments de structure : carbone (C), oxygène (O), hydrogène (H) ;
- Six macro-nutriments (nécessaires en de grandes quantités) : azote (N), phosphore (P), potassium (K), calcium (Ca), magnésium (Mg), soufre (S) ;

- Huit micro-nutriments (nécessaires mais en de moins fortes quantités) : fer (Fe), zinc (Zn), manganèse (Mn), cuivre (Cu), bore (B), molybdène (Mo), chlore (Cl), nickel (Ni).

Les biostimulants microbiens jouent sur la teneur de ces nutriments en fonction de leurs propres caractéristiques (PGPR, AMF, etc.) en améliorant leur biodisponibilité, stimulant la croissance racinaire, etc. Cela favorise alors la croissance et la performance de la plante.

3.3.3 Rôle des biostimulants, exemple

Chaque biostimulant a un rôle différent en fonction de la substance ou du microorganisme qui le compose.

Un biostimulant à base de bactéries :

Une étude a été menée sur l'usage d'un biostimulant à base de deux souches de bactéries, *Bacillus subtilis* et/ou *Paenibacillus* sp (des PGPR), sur trois variétés de framboise afin d'en améliorer la qualité via leurs teneurs en antioxydants, enzymes, etc., ainsi que pour étudier le rôle de ces PGPR. Les résultats ont montré que l'application de ce biostimulant a notamment augmenté la qualité et l'efficacité des antioxydants dans les trois types de variétés de framboise, avec une augmentation entre 16% et 20% selon la variété et la saison (Drobek et al., 2024).

4. Biotechnologie verte : Industrie agro-alimentaire

4.1 La fermentation

La fermentation est une biotechnologie de grande importance dans le secteur agro-alimentaire. Elle est connue pour être à l'origine de nombreux mets et boissons tels que le kimchi, le fromage, le kombucha ou encore la bière. Mais elle joue aussi un rôle non négligeable pour nourrir le bétail, via la méthode de l'ensilage. Nous allons dans cette section détailler cette biotechnologie à destinations fourragère, alimentaire, ainsi que donner trois exemples de produits alimentaires courants faisant intervenir la fermentation.

4.1.1 Qu'est-ce que la fermentation ?

La fermentation est décrite comme un processus métabolique microbien dans lequel des bactéries, levures ou moisissures transforment les glucides (sucres, grains, matières végétales) en alcools, acides ou gaz, généralement en absence d'oxygène (Praveen et al., 2025). Cette fermentation constitue une biotechnologie de contrôle de l'activité des microorganismes dans le but de préserver ou de transformer des matières premières alimentaires (Siddiqui et al., 2023). Historiquement utilisée pour augmenter la durée de conservation des aliments, elle contribue également à leur texture, leur arôme, leur digestibilité, au combat contre les pathogènes (sécurité microbiologie), ainsi qu'à la valeur nutritionnelle de ces aliments (Siddiqui et al., 2023 ; Voidarou et al., 2020). Nous distinguons les méthodes de fermentation naturelle utilisant les microorganismes déjà présents dans la microflore de l'aliment, des méthodes de fermentation contrôlée, qui utilisent des « starter cultures », c'est-à-dire des souches sélectionnées de microorganismes fermentaires ajoutées en forte concentration (Siddiqui et al., 2023).

4.1.2 Fermentation pour l'ensilage

L'ensilage est un processus biologique microbien fondamental utilisé pour conserver le fourrage. Il repose sur la fermentation spontanée, dans des conditions anaérobies, de ce fourrage, juste après sa récolte et son hachage. Pour que cette fermentation soit menée à bien, ce fourrage haché est compacté et stocké dans un silo. L'ensilage repose essentiellement sur l'activité des bactéries lactiques (Figure 3). La fermentation spontanée réalisée par ces microorganismes donne lieu à une diminution rapide du pH grâce à l'acide lactique produit, cette chute de pH permettant la préservation du fourrage. Les bactéries lactiques homofermentaires (ex : *Lactobacillus plantarum*) produisent rapidement de grandes quantités d'acide lactique, empêchant ainsi le développement des pathogènes et accélérant la stabilisation du silo. Cependant, leur efficacité est limitée lors de la ré-exposition à l'air car ces pathogènes peuvent alors métaboliser cet acide. Les bactéries lactiques hétérofermentaires (ex: *Leuconostoc*) produisent quant à elles d'autres produits en plus de l'acide lactique, tels que de l'acide acétique, de l'éthanol et du dioxyde de carbone. La présence de ces produits assure une meilleure protection contre les levures et moisissures responsables des détériorations en présence d'oxygène (Okoye et al., 2023).

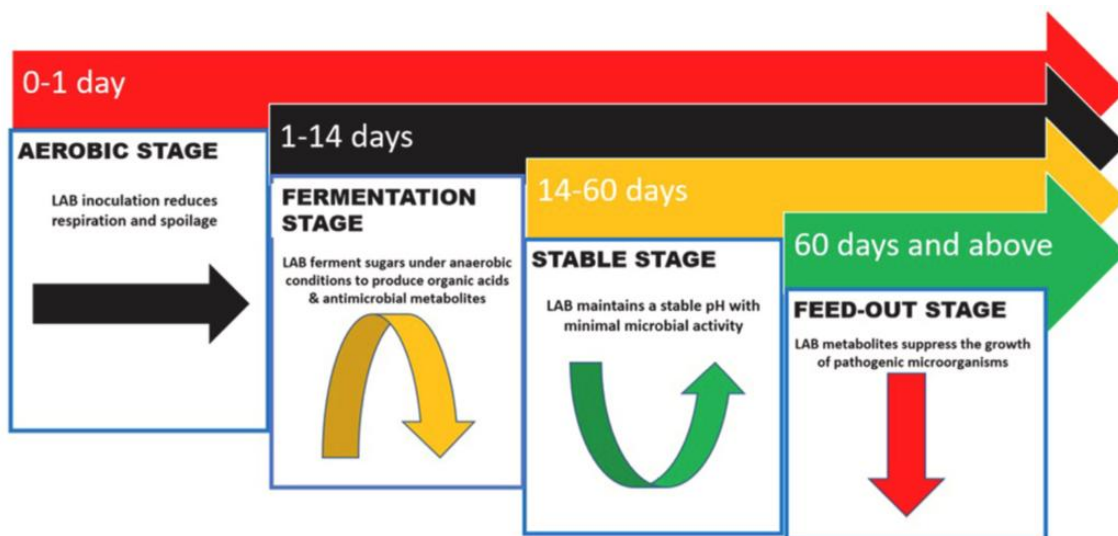


Figure 5 : Schéma décrivant l'activité des bactéries lactiques durant la production d'ensilage. Durant la phase aérobie, les bactéries lactiques réduisent la respiration et la détérioration du fourrage. La phase de fermentation permet la transformation des sucres en acides organiques, dans des conditions anaérobies. La phase stable est caractérisée par une activité microbienne réduite et le maintien d'un pH stable. La dernière phase est celle de l'alimentation, après réouverture des silos et exposition à l'air. Lors de cette étape, les métabolites produits par les bactéries lactiques durant les étapes précédentes empêchent le développement de microorganismes pathogènes. Source : Okoye et al. (2023).

4.1.3 Fermentation à destination alimentaire

Dans l'industrie alimentaire, les microorganismes sont les acteurs principaux de la transformation des matières premières en produits fermentés. Des bactéries lactiques comme *Lactobacillus* ou *Lactococcus* fermentent les sucres en acide lactique, abaissant le pH et créant une barrière antimicrobienne naturelle. Les levures comme *Saccharomyces cerevisiae* produisent éthanol et dioxyde de carbone, créant un environnement défavorable aux pathogènes et donnant naissance aux boissons alcoolisées (Praveen et al., 2025).

Les fermentations alimentaires peuvent être de plusieurs sortes. Par exemple :

- Les fermentations lactiques sont typiques des produits laitiers, légumes fermentés et charcuteries (Siddiqui et al., 2023).
- Les fermentations alcooliques sont principalement conduites par des levures (Praveen et al., 2025).

Dans toutes ces situations, les microorganismes transforment la structure biochimique des aliments, améliorant leur saveur, digestibilité, conservation et valeur nutritive, tout en réduisant les risques de contamination (Siddiqui et al., 2023; Voidarou et al., 2020; Praveen et al., 2025).

4.1.4 Fermentation du yaourt

Les microorganismes centraux dans la fermentation du yaourt sont les bactéries lactiques *Streptococcus thermophilus* et *Lactobacillus delbrueckii* subsp. *bulgaricus* (Chen et al., 2017; Praveen et al., 2025). Ces deux espèces entretiennent une relation symbiotique où leur croissance réciproque est favorisée. Les bactéries lactiques réalisent trois grandes transformations du lait pour obtenir le yaourt. Il s'agit de la glycolyse du lactose en acide

lactique, la protéolyse des protéines du lait, et la lipolyse. Cette dernière réaction consiste en la libération d'acides gras volatils, participant aux arômes du produit final (Chen et al., 2017).

4.1.5 Fermentation de la bière

La fermentation de la bière repose sur l'action des levures, principalement *Saccharomyces cerevisiae*. Les levures métabolisent les sucres du malt pour produire de l'éthanol (constituant principal des boissons alcoolisées), du dioxyde de carbone, ainsi que d'autres composés contribuant à l'arôme de la bière (Raihofer et al., 2022).

4.1.6 Fermentation du kombucha

Le kombucha est produit par un consortium symbiotique de levures et de bactéries acétiques, appelé le SCOBY. Cette symbiose se compose d'une phase liquide acide et d'un biofilm flottant de cellulose. Les levures (principalement du genre *Zygosaccharomyces*) hydrolysent le saccharose en glucose et fructose, puis fermentent ces sucres en éthanol et CO₂. Ensuite, les bactéries acétiques telles que *Acetobacter* ou *Gluconobacter*, oxydent cet éthanol en acide acétique et transforment le glucose en acides gluconique et glucuronique. Ces bactéries produisent également la cellulose formant le SCOBY. La composition finale du kombucha dépend fortement du type d'inoculum, de la concentration en sucre et en thé, ainsi que de la température et de la durée de fermentation. Toute cette dynamique microbienne permet d'obtenir une boisson légèrement carbonatée, acidifiée et aromatique en l'espace de sept à dix jours (Villarreal-Soto et al., 2018).

5. Biotechnologies rouges : Santé

La biotechnologie rouge regroupe l'ensemble des applications des biotechnologies dans le domaine médical et pharmaceutique. Elle utilise des microorganismes, des cellules et des techniques de génie génétique afin de prévenir, diagnostiquer ou traiter des maladies. Dans cette partie, nous allons aborder le rôle des microorganismes probiotiques et leur impact sur la santé humaine, puis l'importance du microbiote intestinal et les facteurs qui influencent son équilibre. Enfin, nous étudierons l'application du génie génétique à travers la production d'insuline recombinante à partir d'organismes génétiquement modifiés.

5.1 Les microorganismes probiotiques

Les probiotiques sont de plus en plus utilisés dans l'alimentation et dans les compléments alimentaires. Ils sont souvent associés à des effets positifs sur la santé, mais leur utilisation soulève des questions, notamment en ce qui concerne leur sécurité et leur rôle potentiel dans la résistance aux antibiotiques.

5.1.1 Définitions et effets sur la santé

Les probiotiques sont définis par l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) comme des microorganismes vivants qui, administrés en quantité adéquate, apportent des bénéfices pour la santé de l'homme et de l'animal (FAO/WHO, 2002; Hill et al., 2014). Ils sont principalement issus de la fermentation et appartiennent majoritairement aux genres bactériens *Lactobacillus*, *Bifidobacterium*, ainsi qu'à *Bacillus*, *Pediococcus* et certaines levures.

Ces microorganismes contribuent au maintien de l'équilibre du microbiote intestinal, au renforcement du système immunitaire et à l'inhibition des bactéries pathogènes (Soemarie et al., 2021). Certaines études suggèrent également des effets bénéfiques sur la réduction du cholestérol et la prévention de certaines pathologies, notamment celles associées à certains cancers (Zheng et al., 2017).

Pour être considérée comme probiotique, une souche doit être identifiée (genre, espèce, souche), être sûre pour l'usage prévu et avoir fait l'objet d'au moins une étude clinique humaine démontrant un effet bénéfique (Binda et al., 2020) comme le montre la Figure 6.

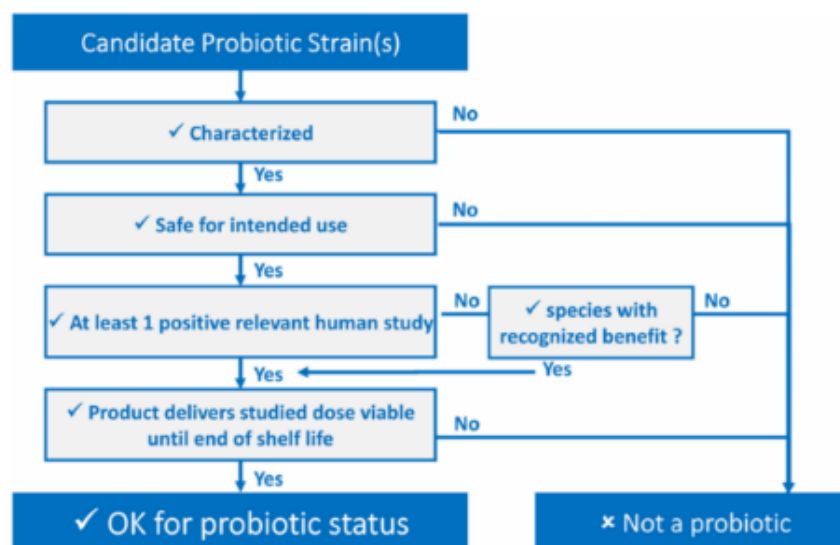


Figure 6 : Arbre décisionnel illustrant les critères scientifiques nécessaires pour attribuer le statut de probiotique à une souche microbienne, incluant sa caractérisation, sa sécurité d'utilisation, l'existence d'au moins une étude clinique positive et la viabilité du produit jusqu'à la fin de sa durée de conservation. Source : Binda et al. (2020).

5.1.2 Risques, limites et précautions

Les antibiotiques sont largement utilisés contre les infections bactériennes, mais leur usage excessif a favorisé l'émergence de bactéries résistantes, constituant un problème majeur de santé publique. Les probiotiques, de plus en plus accessibles pour leurs effets bénéfiques (Min Zheng et al., 2017), contiennent souvent plusieurs souches bactériennes. Celles-ci peuvent transférer leurs gènes de résistance aux bactéries du microbiote intestinal, favorisant leur transmission. Une mauvaise gestion de ces compléments peut entraîner des complications telles que la bactériémie, des effets métaboliques indésirables et un transfert accru de gènes (Min Zheng et al., 2017). Le problème ne réside pas dans la résistance elle-même, mais dans le risque de transmission de ces gènes, ce qui justifie un contrôle rigoureux des probiotiques.

5.2 Le microbiote

5.2.1 Le microbiote intestinal, de quoi s'agit-il ?

Le microbiote intestinal humain est l'ensemble des microorganismes vivant dans le tube digestif, comprenant bactéries, virus, champignons et archées. Souvent qualifié de « véritable organe caché », il joue un rôle essentiel dans la physiologie intestinale et la santé humaine (Landman & Quévrain, 2016).

Dès la naissance, le tube digestif se colonise progressivement. À l'âge adulte, la composition du microbiote devient unique et stable pour chaque individu, présentant un phénomène de résilience. Autrement dit, le microbiote peut retrouver son équilibre initial après une perturbation comme un traitement antibiotique. Cependant, ce retour n'est pas systématique : il dépend de l'individu et peut évoluer vers un nouvel équilibre, parfois altéré (Dogra et al., 2020).

Le microbiote intestinal compte environ 10^{14} microorganismes, répartis sur près de 160 espèces par individu. Plus de 95% de ces bactéries appartiennent à quatre grands groupes bactériens : *Firmicutes*, *Bacteroidetes*, *Actinobacteria* et *Proteobacteria* (Landman & Quévrain, 2016).

On distingue deux compartiments principaux :

- Le microbiote muqueux, fixé à la surface de l'épithélium intestinal, jouant un rôle dans les échanges de nutriments et dans la formation du système immunitaire.
- Le microbiote luminal ou fécal, situé au centre du tube digestif, correspondant aux microorganismes présents dans les selles.

Le microbiote assure de nombreuses fonctions, notamment métaboliques et immunitaires. Il participe à la fermentation des glucides non digérés, comme les fibres alimentaires produisant des acides gras à chaîne courtes (AGCC) qui fournissent de l'énergie aux cellules intestinales et maintiennent la barrière intestinale. Le microbiote intervient aussi dans le métabolisme des lipides, des glucides et des acides biliaires, tout en limitant la colonisation des pathogènes et en contribuant à la maturation du système immunitaire. Un déséquilibre du microbiote, appelé dysbiose, est impliqué dans plusieurs pathologies, notamment les maladies inflammatoires chroniques de l'intestin, le cancer colorectal, l'obésité et certains troubles neurologiques comme l'autisme (Stiemsma et al., 2020).

5.2.2 Comment les habitudes de vie affectent-elles l'équilibre du microbiote intestinal ?

Nos habitudes de vie influencent fortement le microbiote intestinal. L'alimentation, le sommeil, le rythme circadien, le stress et l'activité physique peuvent l'améliorer ou le perturber, avec des conséquences directes sur la santé.

Alimentation

L'alimentation joue un rôle clé dans l'amélioration et la diversité du microbiote intestinal. Les aliments et boissons fermentés contiennent des acides organiques, de l'éthanol et des composés antimicrobiens limitant la croissance de microorganismes pathogènes. Les probiotiques, notamment les bactéries lactiques, contribuent à l'équilibre du microbiote intestinal et au renforcement des systèmes digestif et immunitaire. Le kombucha, boisson fermentée à base de thé, contient des levures, des bactéries lactiques et acétiques produisant des métabolites bénéfiques pour la santé intestinale, en contribuant à la croissance des « bonnes » bactéries et inhibant la prolifération des « mauvaises » bactéries (figure 7). Toutefois, ces effets dépendent du microbiote individuel, de la quantité et de la durée de consommation (Park & Manna, 2025).

Par ailleurs, les microorganismes intestinaux utilisent les fibres alimentaires comme substrat pour produire des métabolites aux effets bénéfiques sur le corps humain : renforcement de la barrière intestinale, réduction de l'inflammation ... (Hindle et al., 2025, Soemarie et al., 2021). Les prébiotiques, un sous-type de fibres, favorisent spécifiquement la croissance de bactéries bénéfiques comme *Bifidobacterium* et *Lactobacillus* (Sebjuk et al., 2024). A l'inverse, une alimentation riche en produits ultra-transformés et pauvre en fibres induit une dysbiose associée à une augmentation de l'inflammation et du risque de maladies métaboliques (Sebjuk et al., 2024).

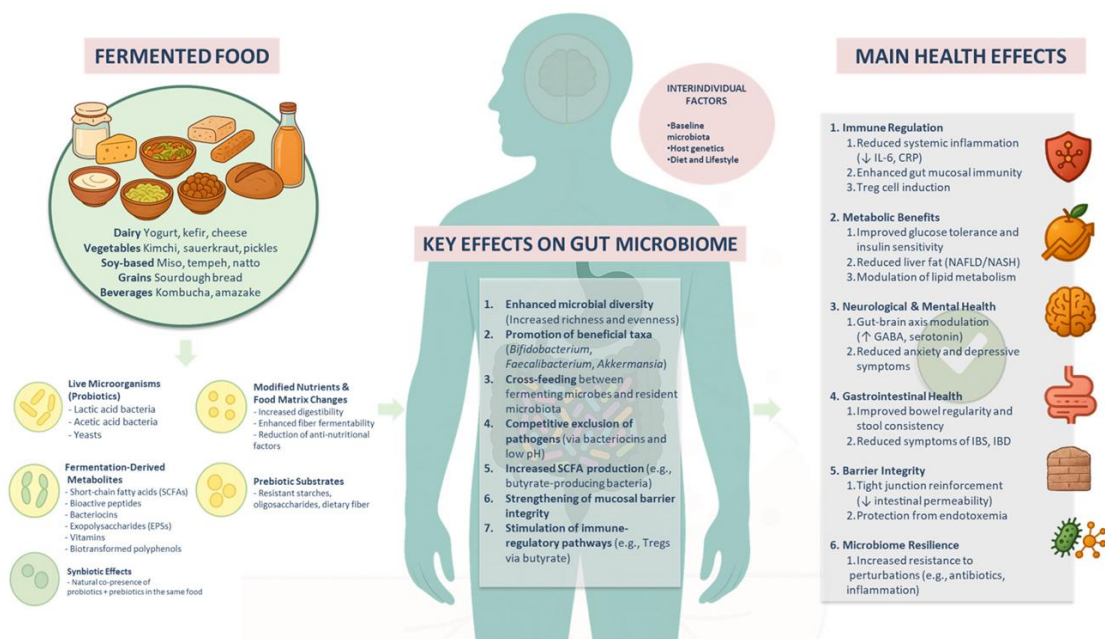


Figure 7 : Schéma illustrant les principaux mécanismes par lesquels les aliments fermentés régulent le microbiote intestinal et influencent la santé de l'hôte. Les aliments fermentés apportent des microorganismes vivants, des métabolites issus de la fermentation et des substrats prébiotiques qui favorisent la diversité microbienne, la production d'acides gras à chaîne courte et la régulation immunitaire. Ces effets contribuent à la santé métabolique, immunitaire et intestinale. La réponse varie selon les facteurs interindividuels. Source : Park & Manna (2025).

Sommeil et rythmes circadiens

Le microbiote influence le sommeil via ses métabolites. Les AGCC passent dans le sang, renforcent la barrière intestinale et agissent sur le cerveau pour réguler l'inflammation et favoriser un sommeil normal. La sérotonine intestinale stimule le nerf vague et sert de précurseur à la mélatonine, tandis que le GABA, un neurotransmetteur calmant, facilite l'endormissement. Une perturbation des rythmes circadiens, due au stress ou à des repas tardifs, peut dérégler ces mécanismes (Figure 8), entraînant troubles du sommeil, inflammation et problèmes digestifs (Sebjuk et al., 2024).

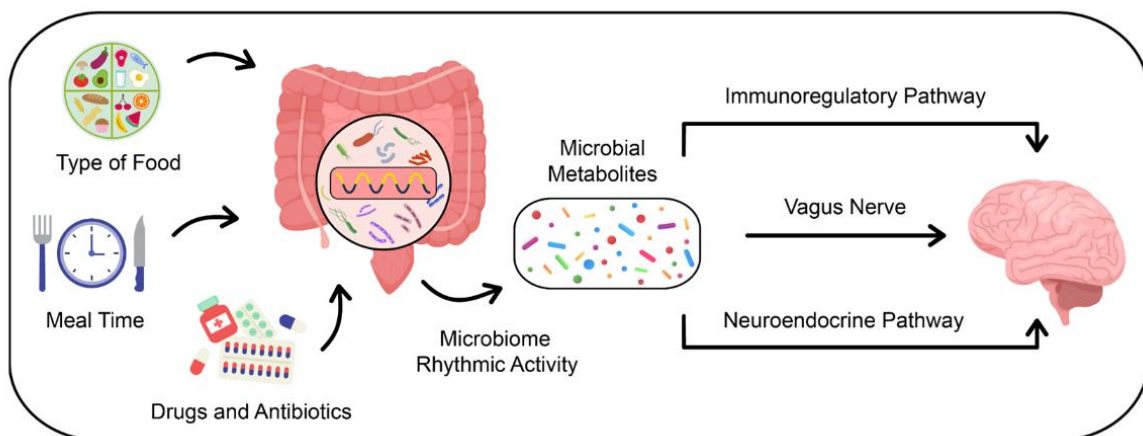


Figure 8 : Représentation schématique des facteurs (alimentation, rythme des repas, médicaments) influençant l'activité du microbiote intestinal et ses voies de communication avec le cerveau. Source : Sebjuk et al. (2024).

Activité physique

L'exercice régulier augmente la diversité microbienne, favorise les bactéries productrices de comrate (*Clostridiales*, *Roseburia*, *Lachnospiraceae*) et *Akkermansia muciniphila*, essentielles pour l'intégrité de la barrière intestinale. En revanche, un exercice excessif peut réduire le flux sanguin intestinal et fragiliser temporairement la muqueuse (Monda et al., 2017).

Ainsi, l'équilibre de notre microbiote dépend directement de nos habitudes : il reflète l'idée que nous sommes en partie ce que nous mangeons.

5.3 Les OGM et la production de l'insuline

Nous retrouvons souvent les OGM dans le domaine agricole, comme expliqué précédemment. Toutefois leur application ne s'y limite pas. De nos jours, cette technologie recombinante est de plus en plus pratiquée dans les secteurs médical et pharmaceutique, dans la production d'une protéine pure spécifique en une quantité considérable (Neiryck & Roch, 2010).

Dans cette partie, nous nous intéresserons surtout à la production d'insuline humaine à partir des OGMs, une hormone protéique utilisée dans le traitement du diabète.

5.3.1 Qu'est-ce que l'insuline ? À quoi sert-elle ?

L'insuline est une hormone sécrétée par les cellules bêta du pancréas, cruciale dans le métabolisme des lipides et glucides de notre corps. En 1921, elle est découverte par les chercheurs Charles Best et Frederick Banting (Govender et al., 2020).

L'insuline permet de diminuer le taux de sucre dans le sang. Cependant, lorsqu'une personne est atteinte de diabète, son corps est incapable d'en produire ou de l'utiliser efficacement, et donc le taux de sucre reste élevé. Dans cette situation, les patients nécessitent une injection médicale de cette hormone afin de réguler le niveau de glucose (Figure 9) (Fédération internationale du diabète, s. d. ; Elsan, s. d. ; Neiryck & Roch, 2010).

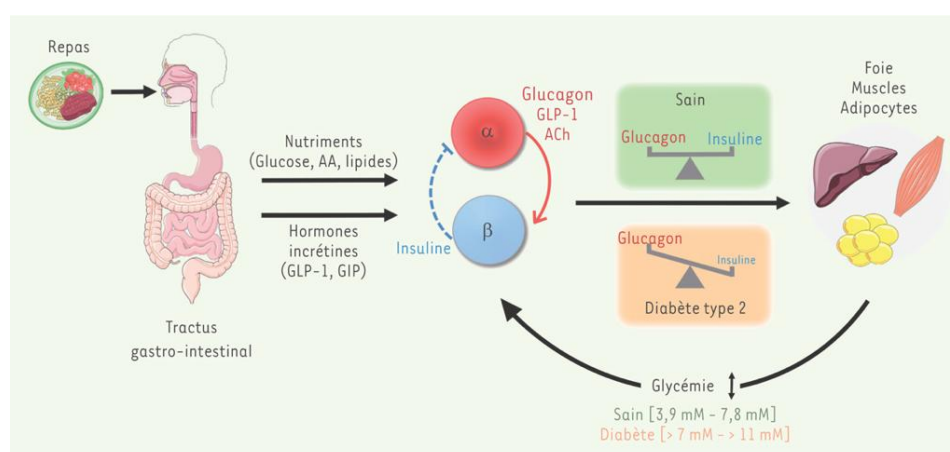


Figure 7 : Schéma illustrant les interactions entre les cellules α et β des îlots pancréatiques dans la régulation de la glycémie. Après un repas, l'augmentation des nutriments dans le sang stimule la sécrétion d'insuline par les cellules β et de glucagon

5.3.2 Avant l'arrivée des OGM

Avant les années 80, l'insuline provenait de bovins ou de porcins, ce qui posait des risques infectieux et ne suffisait pas à répondre à la demande croissante liée au diabète. Aujourd'hui, grâce à l'ADN recombinant, on produit une insuline humaine à partir de bactéries génétiquement modifiées, parfaitement compatible avec notre organisme (Neiryck & Roch, 2010). Cette méthode permet une fabrication rapide, sûre et en grande quantité, sans passer par les animaux (Govender et al., 2020).

5.3.3 Origine des OGM

En 1973, via leurs travaux scientifiques, Stanley Chen et Herbert Boyer établissent la technique de clonage de l'ADN. Le génie génétique se développe : le transfert de gènes entre espèces, qui autrefois était considéré comme très difficile, est rendu possible. Cette

exploitation a non seulement révolutionné le monde génétique mais également le monde thérapeutique. Effectivement, en 1979, grâce aux progrès de la biologie moléculaire, les insulines bovines ou porcines sont substituées par de l'insuline humaine recombinante, appelée humuline. En 1982, cette dernière devient le tout premier médicament commercialisé et approuvé par les instituts médicaux pour le traitement du diabète (Baeshen et al., 2014).

5.3.4 Début des travaux

Lors de la toute première production de l'insuline humaine recombinante, en 1979, les chercheurs n'ont pas encore assez de connaissances sur la séquence du gène humain codant pour cette protéine. Ils ont donc décidé de concevoir en laboratoire un gène synthétique. Néanmoins, les quantités obtenues sont encore très faibles pour considérer une production industrielle. De ce fait, Genentech et Eli Lilly, deux entreprises américaines du secteur biomédical, ont décidé de perfectionner cette approche recombinante pour augmenter le rendement de production en utilisant des bactéries. A cette fin, les chercheurs ont optimisé les promoteurs bactériens et le précurseur de l'insuline appelée proinsuline, ce qui leur a permis d'obtenir plus d'ARN et donc beaucoup plus d'hormones, via une production plus simple et plus rapide. Cette approche s'est avérée très convaincante : avant son utilisation dans le traitement des patients, des tests et contrôles ont été effectués sur l'insuline recombinante pour vérifier son efficacité et sa sécurité (Riggs, 2021; Baeshen et al., 2014; Kim et al., 2024).

5.3.5 Comment cette insuline recombinante est-elle fabriquée ?

L'*E. coli* possède en plus de son propre génome un plasmide, une petite molécule d'ADN circulaire. Ce dernier joue un rôle clé dans la synthèse de l'insuline humaine recombinante. Pour produire de l'insuline humaine, les scientifiques utilisent des bactéries *E. coli* dans lesquelles ils introduisent un plasmide contenant le gène de synthèse de l'insuline. Seules les bactéries ayant intégré ce plasmide survivent en présence d'un antibiotique, ce qui permet de sélectionner celles qui sont modifiées (Figure 10). Après multiplication, ces bactéries fabriquent l'insuline, qui est ensuite extraite et purifiée pour un usage médical (Neiryck & Roch, 2010; Trouvin, 2002).

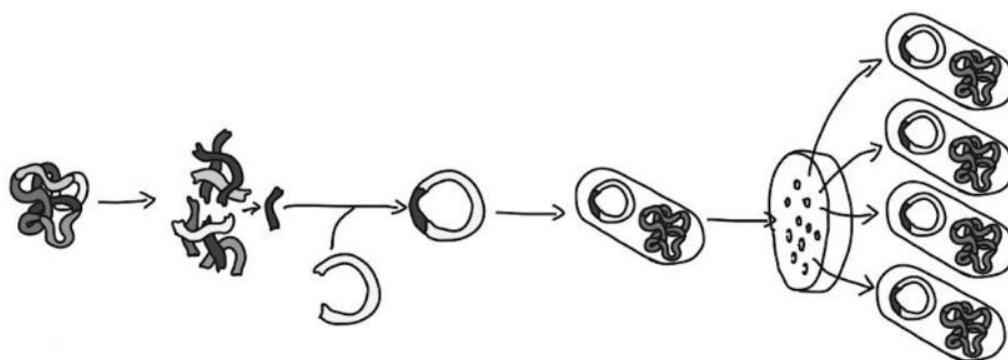


Figure 8 : Schéma illustrant l'insertion d'un gène d'intérêt dans un plasmide, la transformation bactérienne et la sélection des bactéries recombinantes. Source : Neiryck & Roch (2010).

5.3.6 Quels sont les avantages de ce progrès ?

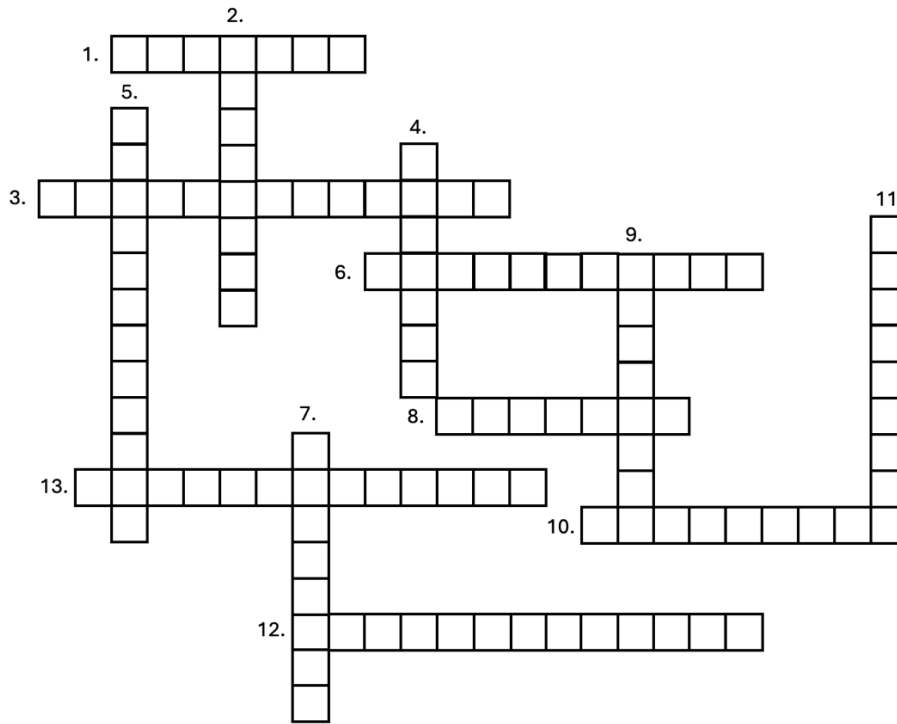
Depuis une vingtaine d'années, les OGMs permettent de produire des hormones molécules comme l'insuline ou des vaccins, de manière rapide, sûre et en grande quantité. Ces protéines

recombinantes sont identiques à celles fabriquées naturellement par le corps humain, ce qui évite toute réaction immunitaire. Grâce à des contrôles stricts, cette méthode est considérée aujourd'hui comme fiable et sans risque sanitaire (Neiryck & Roch, 2010; Duquet, 2003).

5.3.7 Les OGMs, un véritable sujet de débat ?

Selon l'auteur de l'ouvrage « *OGM : Risques et chances* », il existe une différence entre consommer un aliment OGM et recevoir un médicament issu de biotechnologies. L'insuline recombinante soigne directement le patient, tandis que manger une plante OGM implique d'ingérer de l'ADN modifié, parfois avec des gènes d'animaux, ce qui inquiète certains. L'auteur conclut : « Je préfère faire confiance aux médecins qui veulent soigner plutôt qu'aux multinationales motivées par le profit. » Chacun doit donc se forger son opinion sur l'usage des OGMs (Neiryck & Roch, 2010).

6. Mots croisés



1. Produit obtenu via l'activité de décomposition des microorganismes et des vers épiés.
2. Petit élément d'ADN circulaire, présent chez certaines bactéries, capable de se répliquer indépendamment du chromosome.
3. Processus utilisant des microorganismes pour dégrader ou transformer des polluants présents dans l'environnement.
4. À connotation péjorative dans la pensée collective, mais synonyme de microorganisme.
5. Produit utilisé dans le but de stimuler la croissance d'une plante, composé soit de substances ou de microorganismes.
6. Microorganismes vivants qui, lorsqu'ils sont consommés en quantité suffisante, apportent un bénéfice pour la santé, notamment par l'amélioration du microbiote intestinal.
7. Conservation de fourrages par fermentation en silo.
8. Communauté de microorganismes fixée sur une surface et entourée d'une matrice protectrice.
9. Hormone importante pour la régulation du glucose, sécrétée par le pancréas.
10. Molécules bioactives, conçues pour éliminer différentes espèces végétales, animales et fongiques.
11. Milieu pauvre en oxygène.
12. Bactérie du sol capable de transférer de l'ADN dans le génome des plantes.
13. Milieu naturel comprenant l'air, l'eau, le sol et les organismes vivants qui interagissent entre eux.

7. Glossaire

Acide aminé : Molécule organique constituant l'unité de structure des protéines.

Amendement : Substance ajoutée au sol pour améliorer les propriétés biologiques, chimiques ou physiques.

Bactériophages : Virus infectant spécifiquement les bactéries.

Biodisponibilité : Proportion d'une substance réellement accessible et utilisable par un organisme ou par des microorganismes.

Bioréacteur : Dispositif permettant la culture contrôlée de microorganismes, de cellules ou d'enzymes en vue de produire des biomolécules ou de réaliser des biotransformations.

Cellulose : Polymère naturel de glucose constituant le principal composant des parois cellulaires végétales.

Chimiotaxie/ chimiotactisme : Orientation du déplacement cellulaire en réponse à un gradient de substances chimiques.

Consortium : Association de plusieurs microorganismes interagissant de manière coopérative.

Enzyme : Protéines catalysant une réaction biochimique spécifique.

Epigé : Organisme vivant à la surface du sol ou dans les premiers millimètres de la litière.

Epithélium intestinal : Tissu de cellule jointives tapissant la surface interne de l'intestin.

Espèce aérobie : Organisme nécessitant la présence d'oxygène pour son métabolisme.

Espèce anaérobie : Organisme se développant en absence d'oxygène.

Expression de gènes : Ensemble des mécanismes permettant la synthèse d'ARN ou de protéines à partir de l'information contenue dans un gène

Fourrage : Matière végétale destinée à l'alimentation du bétail, constituée principalement de tiges, feuilles ou racines fraîches ou séchées.

Galle du collet : Tumeur végétale induite par la bactérie *Agrobacterium tumefaciens* au niveau de la tige ou du collet.

Génome : Ensemble du matériel génétique d'un organisme

Germination : Processus par lequel une graine reprend son développement pour donner une jeune plante sous l'effet de conditions favorables.

Glycolyse : Voie métabolique de dégradation du glucose en pyruvate, produisant de l'énergie sous forme d'ATP.

Hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) : Composés organiques constitués de cycles aromatiques formés lors de combustions incomplètes.

Hydrolyse : Réaction chimique entraînant la rupture d'une molécule par action de l'eau.

Inoculum : Quantité initiale de microorganismes introduite dans un milieu de culture.

Lipolyse : Processus de dégradation des lipides par hydrolyse enzymatique.

Macro-organismes : Organismes visibles à l'œil nu.

Malt : Orge germée et séchée utilisée en particulier pour la fabrication de la bière.

Organismes mésophiles : Organismes se développant de manière optimale à des températures modérées, généralement entre 20 et 45 °C.

Métaux lourds : Éléments métalliques de fortes densité pouvant être toxiques pour les organismes vivants à certaines concentrations.

Milieu aérobie : Environnement contenant de l'oxygène.

Milieu anaérobie : Environnement dépourvu d'oxygène.

Minéralisation : Processus de transformation de matière organique en éléments minéraux simples.

Moisissure : Champignon microscopique filamenteux.

Molécules bioactives : Composés produits par des organismes vivants exerçant un effet biologique mesurable.

Nutriment :

- Définition 1: si manquant, la plante ne peut compléter son cycle de vie (Sprengel, 1839; Arnon et Stout, 1939).
- Définition 2 : c'est un élément qui a un rôle physiologique (Epstein, 1999).

Oxydation : Réaction chimique correspondant à une perte d'électrons par un atome, une molécule ou un ion.

Peptide : Molécule formée par l'enchaînement de plusieurs acides aminés liés par des liaisons peptidiques.

Pesticides : Substances chimiques ou biologiques utilisées pour éliminer des organismes nuisibles.

Plasmide : Molécule d'ADN circulaire extrachromosomique présente chez certaines bactéries

Polymères extracellulaire : Macromolécule produite et excrétée par des microorganismes dans le milieu extracellulaire, contribuant à la structure et à la cohésion du biofilm.

Promoteurs bactériens : Régions d'ADN permettant l'initiation de la transcription d'un gène.

Protéolyse : Processus de dégradation hydrolytique des protéines.

PGPR (Plant Growth-Promoting Rhizobacteria) : Rhizobactéries favorisant la croissance des plantes.

Saccharose : Disaccharide composé d'une molécule de glucose et d'une molécule de fructose liés par une liaison osidique, de formule brute $C_{12}H_{22}O_{11}$

SCOBY : Culture symbiotique de bactéries et de levures utilisée pour la fermentation du kombucha.

Silo : Structure destinée au stockage et à la conservation des fourrages.

Sphalérite : Minéral composé principalement de sulfure de zinc.

Stress abiotique : Contrainte environnementale non vivante affectant la croissance ou la survie des organismes.

Substrat (dans le biofilm) : Surface ou support solide sur laquelle les microorganismes adhèrent et forment un biofilm.

Symbiose : Association durable entre organismes de différentes espèces procurant un bénéfice mutuel.

Technique de clonage de l'ADN : Méthode de biologie moléculaire permettant l'amplification d'un fragment d'ADN par insertion dans un vecteur introduit dans un organisme hôte.

Organismes thermophiles : Organismes se développant de manière optimale à des températures élevées, généralement entre 45 °C et 80 °C.

Transgène : Gène artificiellement introduit dans le génome d'un organisme.

UPP (Unipolar polysaccharide) : Polysaccharide produit à un seul pôle de certaines bactéries, notamment *Agrobacterium tumefaciens*, impliqué dans l'adhésion aux surfaces et la formation de biofilms.

Virulence : Aptitude des germes pathogènes à se développer et à sécréter des toxines dans un organisme.

8. Références

8.1 Bibliographie :

Al-Ani, M. A. M., Hmoshi, R. M., Kanaan, I. A., & Thanoon, A. A. (2019). Effect of pesticides on soil microorganisms. *Journal of Physics: Conference Series*, 1294, 072007. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1294/7/072007>

Baeshen, N. A., Baeshen, M. N., Sheikh, A., Bora, R. S., Ahmed, M. M. M., Ramadan, H. A. I., Saini, K. S., & Redwan, E. M. (2014). Cell factories for insulin production. *Microbial Cell Factories*, 13(1), 141. <https://doi.org/10.1186/s12934-014-0141-0>

Binda, S., Hill, C., Johansen, E., Obis, D., Pot, B., Sanders, M. E., Tremblay, A., & Ouwehand, A. C. (2020). Criteria to qualify microorganisms as “probiotic” in foods and dietary supplements. *Frontiers in Microbiology*, 11, 1662. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.01662>

Brady, N. C., & Weil, R. R. (2016). Section 12.11: Compost and composting. In *The nature and properties of soils* (pp. 593-597). Pearson.

Briceño, G., Diez, M. C., Palma, G., Jorquera, M., Schalchli, H., Saez, J. M., & Benimeli, C. S. (2024). Neonicotinoid effects on soil microorganisms: Responses and mitigation strategies. *Sustainability*, 16, 3769. <https://doi.org/10.3390/su16093769>

Chen, C., Zhao, S., Hao, G., Yu, H., Tian, H., & Zhao, G. (2017). Role of lactic acid bacteria on the yogurt flavour: A review. *International Journal of Food Properties*, 20(sup1), S316–S330. <https://doi.org/10.1080/10942912.2017.1295988>

Dogra, S. K., Doré, J., & Damak, S. (2020). Gut microbiota resilience: Definition, link to health and strategies for intervention. *Frontiers in Microbiology*, 11, 572921. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.572921>

Drobek, M., Cybulska, J., Zdunek, A., Sas-Paszt, L., & Frac, M. (2024). Effect of microbial biostimulants on the antioxidant profile, antioxidant capacity and activity of enzymes influencing the quality level of raspberries (*Rubus idaeus* L.). *Food Chemistry*, 454, 139746. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.139746>

Du Jardin, P. (2015). Plant biostimulants : Definition, concept, main categories and regulation. *Scientia Horticulturae*, 196, 3-14. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.09.021>

Duquet, D. (2003). *Pour une gestion éthique des OGM: Avis* (p. xi-xiv). Commission de l'éthique de la Science et de la technologie.

Ecklu-Mensah, G., Miller, R., Maseng, M. G., Hawes, V., Hinz, D., Kim, C., & Gilbert, J. A. (2024). Modulating the human gut microbiome and health markers through kombucha consumption: A controlled clinical study. *Scientific Reports*, 14(1), 31647. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-80281-w>

Fischer, K. L., Jaffredo, M., Lang, J., & Raoux, M. (2021). Cellules α et β du pancréas : Meilleures ennemies ou partenaires pour la vie ? *médecine/sciences*, 37(8-9), 752-758. <https://doi.org/10.1051/medsci/2021111>

Gadd, G. M. (2010). Metals, minerals and microbes : Geomicrobiology and bioremediation. *Microbiology*, 156(3), 609-643. <https://doi.org/10.1099/mic.0.037143-0>

Govender, K., Naicker, T., Lin, J., Baijnath, S., Chuturgoon, A. A., Abdul, N. S., Docrat, T., Kruger, H. G., & Govender, T. (2020). A novel and more efficient biosynthesis approach for human insulin production in *Escherichia coli* (*E. coli*). *AMB Express*, 10(1), Article 43. <https://doi.org/10.1186/s13568-020-00969-w>

Guo, M., Ye, J., Gao, D., Xu, N., & Yang, J. (2019). Agrobacterium-mediated horizontal gene transfer: Mechanism, biotechnological application, potential risk and forestalling strategy. *Biotechnology Advances*, 37(1), 259-270. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2018.12.008>

Haritash, A. K., & Kaushik, C. P. (2009). Biodegradation aspects of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs): A review. *Journal of Hazardous Materials*, 169(1-3), 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.03.137>

Hindle, V. K., Veasley, N. M., & Holscher, H. D. (2025). Microbiota-Focused dietary approaches to support health : A Systematic Review. *The Journal of Nutrition*, 155(2), 381-401. <https://doi.org/10.1016/j.tjnut.2024.10.043>

Kim, M.-J., Park, S.-L., Kim, H.-J., Sung, B. H., Sohn, J.-H., & Bae, J.-H. (2024). Functional expression of recombinant insulins in *Saccharomyces cerevisiae*. *Microbial Cell Factories*, 23(1), 302. <https://doi.org/10.1186/s12934-024-02571-2>

Landman, C., & Quévrain, E. (2016). Le microbiote intestinal : Description, rôle et implication physiopathologique. *La Revue de Médecine Interne*, 37(6), 418-423. <https://doi.org/10.1016/j.revmed.2015.12.012>

Lončarić, Z., Galić, V., Nemet, F., Perić, K., Galić, L., Ragályi, P., Uzinger, N., & Rékási, M. (2024). The Evaluation of Compost Maturity and Ammonium Toxicity Using Different Plant Species in a Germination Test. *Agronomy (Basel)*, 14(11), 2636. <https://doi.org/10.3390/agronomy14112636>

Megharaj, M., Ramakrishnan, B., Venkateswarlu, K., Sethunathan, N., & Naidu, R. (2011). Bioremediation approaches for organic pollutants : A critical perspective. *Environment International*, 37(8), 1362-1375. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2011.06.003>

Mishra, S., Huang, Y., Li, J., Wu, X., Zhou, Z., Lei, Q., Bhatt, P., & Chen, S. (2022). Biofilm-mediated bioremediation is a powerful tool for the removal of environmental pollutants. *Chemosphere*, 294, 133609. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.133609>

Monda, V., Villano, I., Messina, A., Valenzano, A., Esposito, T., Moscatelli, F., Viggiano, A., Cibelli, G., Chieffi, S., Monda, M., & Messina, G. (2017). Exercise Modifies the Gut Microbiota with Positive Health Effects. *Oxidative Medicine and Cellular Longevity*, 2017(1), 3831972. <https://doi.org/10.1155/2017/3831972>

Neiryneck, J., & Roch, P. (2010). Chapitre 3 : Qu'est-ce qu'un OGM ? In J. Neiryneck & P. Roch (Éds.), OGM : Risques et chances. Plaidoyer pour le respect de la vie (p. 45–60). Éditions Jouvence.

- Okoye, C. O., Wang, Y., Gao, L., Wu, Y., Li, X., Sun, J., & Jiang, J. (2023). The performance of lactic acid bacteria in silage production: A review of modern biotechnology for silage improvement. *Microbiological Research*, 266, 127212. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2022.127212>
- Oliver, M. J. (2014). Why we need GMO crops in agriculture. *Missouri Medicine*, 111(6), 492–507. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/25665234/>
- Park, I., & Mannaa, M. (2025). Fermented foods as functional systems: Microbial communities and metabolites influencing gut health and systemic outcomes. *Foods*, 14(13), 2292. <https://doi.org/10.3390/foods14132292>
- Prashar, P., & Shah, S. (2016). Impact of fertilizers and pesticides on soil microflora in agriculture. In E. Lichtfouse (Ed.), *Sustainable Agriculture Reviews* 19 (pp. 331-353). Springer. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-26777-7_8
- Praveen, M., & Brogi, S. (2025). Microbial fermentation in food and beverage industries: innovations, challenges, and opportunities. *Foods*, 14(1), 114. <https://doi.org/10.3390/foods14010114>
- Raihofer, L., Zarnow, M., Gastl, M., & Hutzler, M. (2022). A short history of beer brewing: Alcoholic fermentation and yeast technology over time. *EMBO Reports*, 23(12). <https://doi.org/10.15252/embr.202256355>
- Riggs, A. D. (2021). Making, cloning, and the expression of human insulin genes in bacteria: The path to humulin. *Endocrine Reviews*, 42(3), 374-380. <https://doi.org/10.1210/endrev/bnaa029>
- Roman, D. L., Voiculescu, D. I., Filip, M., Ostafe, V., & Isvoran, A. (2021). Effects of triazole fungicides on soil microbiota and on the activities of enzymes found in soil: A review. *Agriculture*, 11, 893. <https://doi.org/10.3390/agriculture11090893>
- Sejbuk, M., Siebieszuk, A., & Witkowska, A. M. (2024). The role of gut microbiome in sleep quality and health : Dietary strategies for microbiota support. *Nutrients*, 16(14), 2259. <https://doi.org/10.3390/nu16142259>
- Siddiqui, S. A., Erol, Z., Rugji, J., Taşçı, F., Kahraman, H. A., Toppi, V., Musa, L., Di Giacinto, G., Bahmid, N. A., Mehdizadeh, M., & Castro-Muñoz, R. (2023). An overview of fermentation in the food industry - looking back from a new perspective. *Bioresources and Bioprocessing*, 10(1), 85. <https://doi.org/10.1186/s40643-023-00702-y>
- Singh, R., Paul, D., & Jain, R. K. (2006). Biofilms: Implications in bioremediation. *Trends in Microbiology*, 14(9), 389-397. <https://doi.org/10.1016/j.tim.2006.07.001>

Soemarie, Y. B., Milanda, T., & Barliana, M. I. (2021). Fermented foods as probiotics : A Review. *Journal of Advanced Pharmaceutical Technology & Research*, 12(4), 335-339. https://doi.org/10.4103/japtr.japtr_116_21

Stiemsma, L. T., Nakamura, R. E., Nguyen, J. G., & Michels, K. B. (2020). Does consumption of fermented foods modify the human gut microbiota? *The Journal of Nutrition*, 150(7), 1680-1692. <https://doi.org/10.1093/jn/nxaa077>

Sun, W., & Shahrajabian, M. H. (2023). The application of arbuscular mycorrhizal fungi as microbial biostimulant, sustainable approaches in modern agriculture. *Plants*, 12(17), 3101. <https://doi.org/10.3390/plants12173101>

Trouvin, J.-H. (2002). Sécurité sanitaire des OGM utilisés en thérapeutique. *Bulletin de l'Académie Nationale de Médecine*, 186(8), 1401–1409. <https://www-sciencedirect-com.ezproxy.ulb.ac.be/science/article/pii/S000140791934141X?via%3Dihub>

Villarreal-Soto, S. A., Beaufort, S., Bouajila, J., Souchard, J., & Taillandier, P. (2018). Understanding kombucha tea fermentation: A Review. *Journal of Food Science*, 83(3), 580–588. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.14068>

Voidarou, C., Antoniadou, M., Rozos, G., Tzora, A., Skoufos, I., Varzakas, T., Lagiou, A., & Bezirtzoglou, E. (2021). Fermentative foods: Microbiology, biochemistry, potential human health benefits and public health issues. *Foods*, 10(1), 69. <https://doi.org/10.3390/foods10010069>

Wang, J.-W., Han, C.-T., Wu, D.-M., Zhou, W., Gao, M., & Li, Y.-S. (2025). Microbial composition, assembly, and functional characteristics of generalized and specialized subcommunities under flooded paddy fields: long-term pesticide versus non-pesticide models. *Frontiers in Microbiology*, 16, 1636555. <https://www.frontiersin.org/journals/microbiology/articles/10.3389/fmicb.2025.1636555/full>

Zheng, M., Zhang, R., Tian, X., Zhou, X., Pan, X., & Wong, A. (2017). Assessing the risk of probiotic dietary supplements in the context of antibiotic resistance. *Frontiers in Microbiology*, 8, 908. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.00908>

Ziemienowicz, A. (2014). Agrobacterium-mediated plant transformation: Factors, applications and recent advances. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 3(4), 95-102. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2013.10.004>

8.2 Webographie :

Fédération Internationale du Diabète. (s. d.). *Comprendre l'insuline*. Consulté le 20 novembre 2025, à l'adresse <https://idf.org/fr/about-diabetes/diabetes-management/insulin/>

Elsan. (s. d.). *Insuline : Définition, causes et traitements*. Consulté le 20 novembre 2025, à l'adresse <https://www.elsan.care/fr/pathologie-et-traitement/maladies-endocriniennes/insuline-causes-traitements>