

Interactions microbiennes

Interactions microbiennes

I- Introduction : notions d'écologie microbienne

II- Interactions entre microorganismes et milieu physique

1. Microorganismes dans un milieu complexe (sol) et un milieu simple (bioréacteur) ;
2. Notion de biofilms ;
3. Bactéries non-cultivables.

III- Interactions entre microorganismes : notion de détection du quorum (quorum sensing) et signaux de communication.

IV- Interactions avec les organismes supérieurs : symbiose et parasitisme.

1. Interactions microorganismes et végétaux,
2. Interactions microorganismes et animaux

I- Introduction : notions d'écologie microbienne

L'écologie microbienne aborde :

- la place et le rôle des **micro-organismes** dans un habitat (environnement, **écosystème**)
- les **interactions** des micro-organismes entre eux et avec leur milieu.

L'écologie microbienne consiste à :

- Caractériser la **biodiversité** microbienne d'un écosystème,
- Caractériser les **interactions** entre micro-organismes (chaînes trophiques),
- Identifier le **rôle** des micro-organismes dans l'écosystème,
- Étudier les interactions hôtes-microorganismes (**symbiose, commensalisme, parasitisme, pathogénie...**).

Rôle de l'écologie?

- Elle étudie les relations entre organismes et entre organismes et milieu physique
 - Interactions entre le sol et les plantes
 - Interactions entre les organismes du sol et les plantes
 - Effet des pratiques culturales sur ces interactions

Interactions entre le biologique et le physico-chimique

Les microorganismes occupent de multiples milieux naturels : sols, lacs, rivières, océans...

Ils **interagissent avec leur environnement** en participant activement aux cycles biogéochimiques : carbone, azote, soufre, métaux...

Les microorganismes saprophytes se nourrissent de matières organiques présentes dans l'environnement.

Dans un sol par exemple, la flore microbienne tellurique participe activement à la décomposition de la matière organique (minéralisation). Ces micro-organismes (bactéries et champignons principalement) sont des **décomposeurs**.

Dans les écosystèmes aquatiques, les bactéries assurent également la décomposition des matières organiques en solution.

En surface, d'autres bactéries (Cyanobactéries, bactéries pourpres et vertes) et des algues unicellulaires assurent au contraire la production primaire de matière organique grâce à la **photosynthèse**

Les microorganismes :

- très nombreux,
- ubiquistes (présents partout dans le monde),
- très diversifiés,
- très adaptatifs,
- ont une **importance primordiale dans de nombreux domaines.**

L'écologie microbienne couvre donc des domaines très variés :

Cycle biogéochimique de la matière : importance de la biodiversité microbienne dans les **cycle du carbone, cycle de l'azote, cycle du soufre, cycle du phosphate...**

Dépollution : dépollution naturelle des milieux grâce aux micro-organismes et utilisation des micro-organismes dans le traitement des eaux usées ou des sols pollués.

Agriculture : interaction des micro-organismes avec les plantes (**symbiose** ou **pathogénie**).

Médecine humaine et vétérinaire : importance des **parasites**, des **bactéries** et virus **pathogènes**.

Agroalimentaire :

- importance de la biodiversité microbienne dans des processus de transformation ou de fermentation de produits alimentaires (fromage, yaourt, vin, choucroute, saucisson...);
- rôle de certains micro-organismes dans l'altération de produits alimentaires.
- Maîtrise des contaminations via la maîtrise des flores en place.

Biotechnologie : connaissance de la biodiversité microbienne pour caractériser des nouvelles molécules ayant des propriétés intéressantes pour les milieux pharmaceutiques et/ou industriels.

Évolution : l'organisme ancestral ayant entraîné l'apparition de la vie était probablement proche des bactéries actuelles.

L'Écologie microbienne **nécessite la capacité de mesurer et d'évaluer** une variété de paramètres sur l'habitat, la communauté d'organismes présents, et l'effet des organismes sur l'environnement. Ceci inclus, mais ne se limite pas à ce qui suit :

- Mesurer les paramètres abiotiques ;
- Dénombrement des organismes présents ;
- Visualiser la morphologie des organismes et leur relations avec leur environnement ;
- Cultiver les organismes présents ;
- Identifier les organismes présents et leur diversité ;
- Étudier les voies métaboliques empreintées par les communautés d'organismes ;
- Mesurer et identifier les produits métaboliques et leur effets sur l'habitat.

Les écosystèmes

Un écosystème est une unité écologique formée d'un biotope correspondant à l'ensemble des **paramètres abiotiques** (ou physico-chimiques) et d'une **biocénose** correspondant à l'ensemble des organismes vivants.

Ces deux ensembles, qui constituent chaque écosystème, entretiennent de nombreux types d'interactions différentes (Fig. 1).

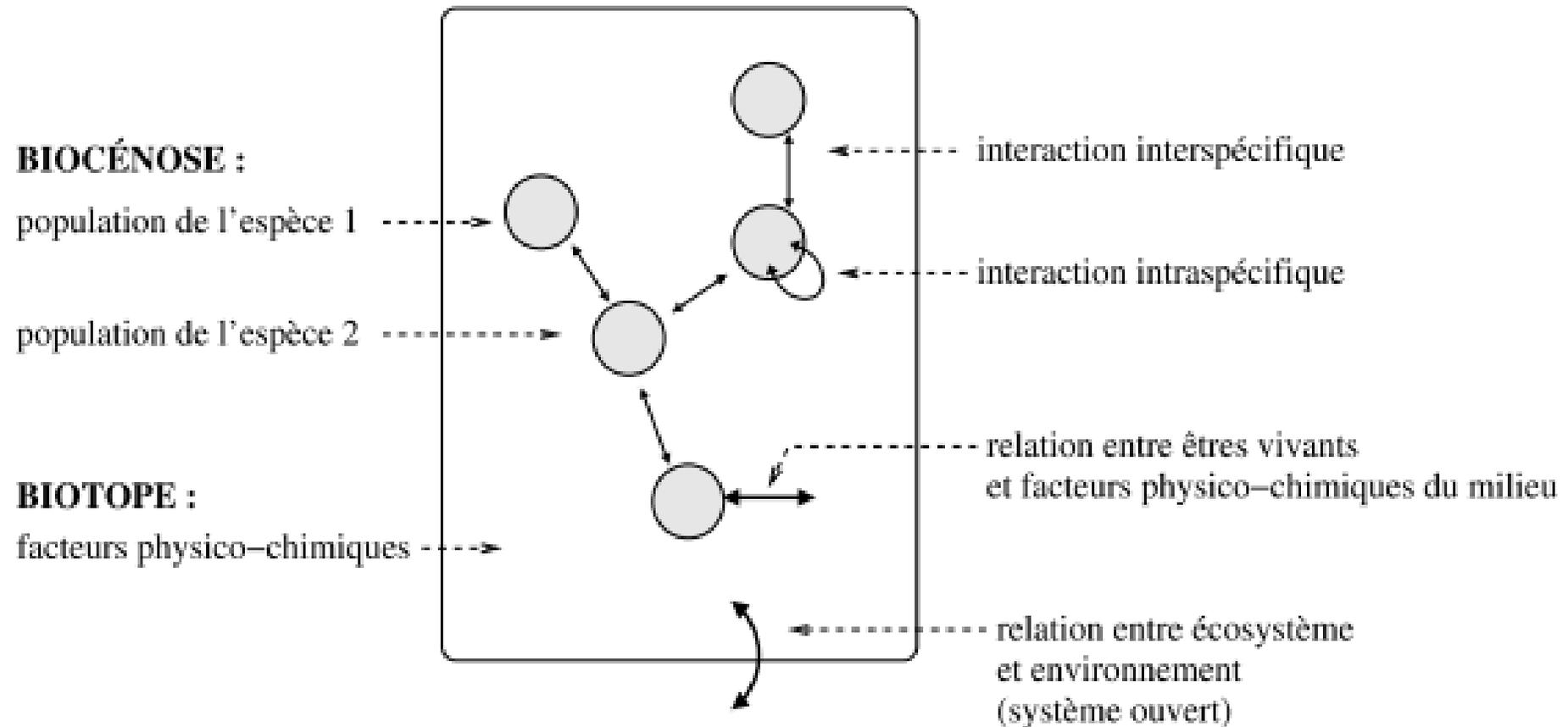
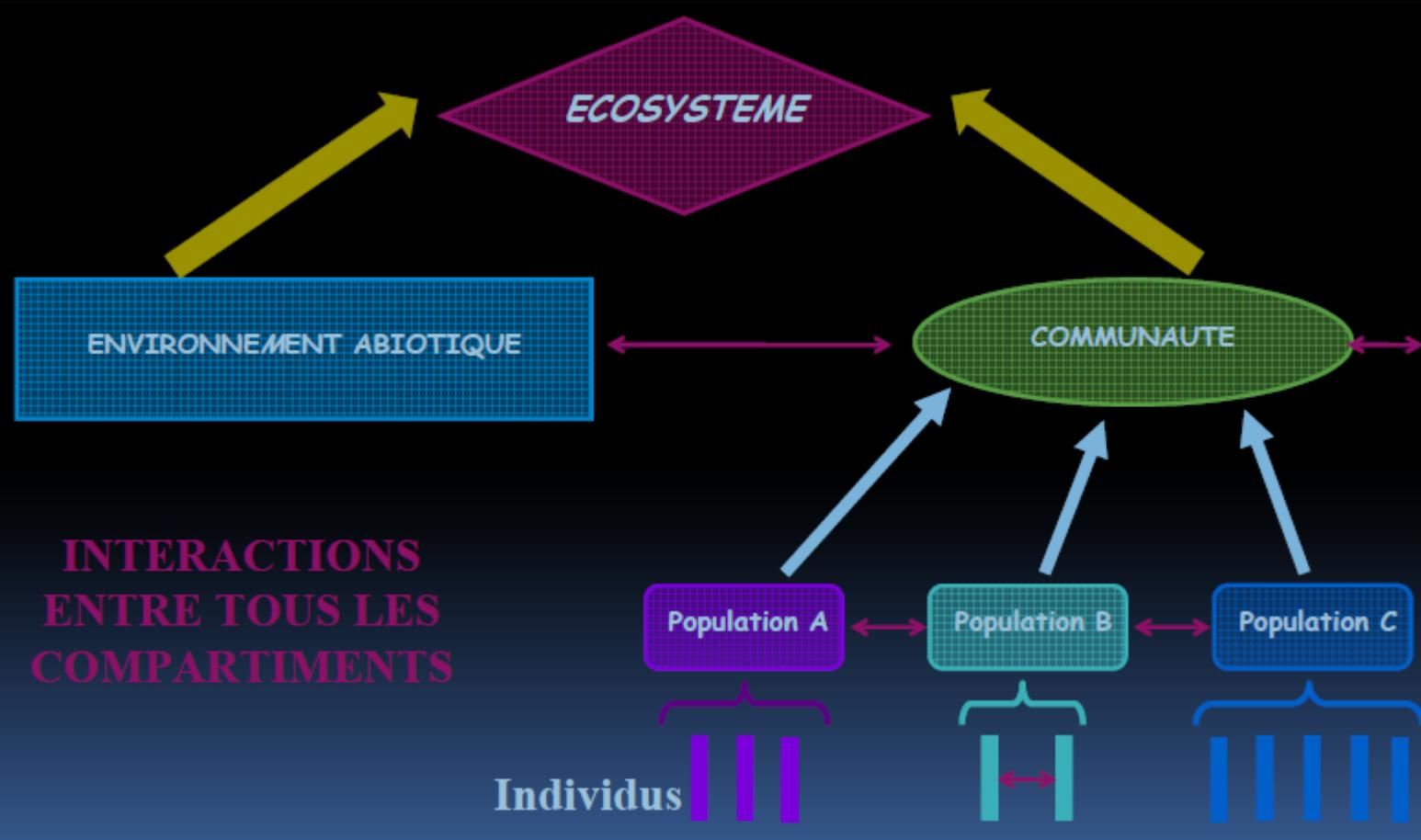


Figure 1 : Interactions au sein d'un écosystème



Ainsi, un écosystème inclut :

- Le **biotope**, facteurs physico-chimiques du milieu (structure physique, température, intensité lumineuse, humidité, teneur en éléments chimiques...).
- La **biocénose**, ensemble des êtres vivants.
- Les **relations entre les êtres vivants** (interactions inter et intraspécifiques).
- Les **relations entre les êtres vivants et leur biotope**.
- Les **relations entre la biocénose, le biotope et l'environnement**.

2. La biodiversité et les interactions : la complexité du vivant

Diversité biologique : variabilité des organismes vivants de toute origine y compris, entre autres, les écosystèmes terrestres, marins et autres écosystèmes aquatiques et les complexes écologiques dont ils font partie:
= cela comprend la diversité au sein des espèces et entre espèces ainsi que celle des écosystèmes. »

La diversité est en générale subdivisée en trois niveaux :

- La **diversité génétique** qui se définit par la variabilité des gènes au sein d'une même espèce ou d'une population. On parle aussi de diversité intraspécifique qui se caractérise par la différence de deux individus d'une même espèce ou sous-espèce.

- La **diversité spécifique**, appelée aussi diversité interspécifique qui correspond à la diversité des espèces. Ce niveau est le plus couramment utilisé par les écologues.

- La **diversité écosystémique**, qui correspond à la diversité des écosystèmes présents sur Terre, des interactions des populations naturelles et de leur environnement physique.

La plupart des études s'intéressent plus particulièrement à la diversité spécifique car elle constitue le palier le plus abordable tant au niveau conceptuel que pratique.

La **diversité biologique** présente au moins deux dimensions dans un environnement donné :

- la **composition** représentant le nombre d'espèces présentes
- la **structure** représentant l'organisation des espèces présentes en termes de nombre d'individus.

Cette différenciation conduit à l'existence de différents outils de mesure de la diversité spécifique.

Diversité des interactions du vivant

Une **interaction biologique** (ou biotique) désigne un processus impliquant des échanges ou relations réciproques entre deux ou plusieurs éléments (espèces, groupes, biocénoses) dans un écosystème.

Les interactions constituent un **ensemble complexe de phénomènes biologiques hétérogènes** dont la classification s'est avérée nécessaire.

- Si une interaction biologique a lieu **entre deux individus** ou populations issus d'espèces différentes alors l'interaction sera qualifiée **d'interspécifique**.
- Si une interaction concerne deux individus ou plusieurs individus d'une **même population** alors elle sera qualifiée **d'intraspécifique**.

Les interactions sont caractérisées par leurs effets apparents (**description phénoménologique**) avant qu'elles ne le soient en fonction du mécanisme biologique impliqué (**description mécaniste**).

a. La description phénoménologique des interactions

Elle considère que chaque individu ou population peut avoir un **effet positif** (facilitation, mutualisme,), **négatif** (inhibition, compétition, prédation) ou **neutre** (absence d'effet) sur la croissance d'un autre individu ou d'une population.

La nature de l'interaction bidirectionnelle établie entre deux partenaires dépend du signe des effets unidirectionnels de chacun des deux partenaires sur l'autre partenaire (Figure).

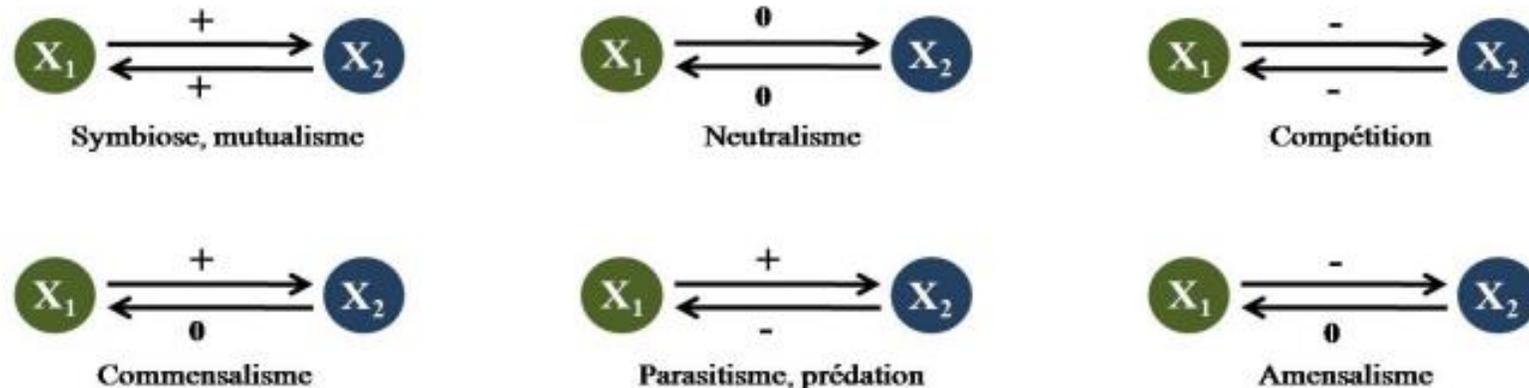


Figure : Schéma représentant la classification phénoménologique des interactions biotiques

Tableau 2: Synthèse des différents types d'interactions interspécifiques et effets sur les protagonistes. (+) bénéfique, (0) ni bénéfique ni effet délétère, (-) effet délétère.

Interactions	Organisme A	Organisme B
Compétition	-	-
Parasitisme	-	+
Amensalisme	-	0/+
Neutralisme	0	0
Commensalisme	+	0
Mutualisme	+	+
Symbiose	+	+

Interactions négatives

La **compétition** existe entre un organisme A et B vivants au sein d'une même niche écologique, lorsque ceux-ci luttent pour l'espace et/ou les ressources. La **compétition** est d'autant plus forte que les besoins des organismes sont proches.

L'interaction est qualifiée de **parasitisme** lorsque l'organisme A (le parasite) se développe au détriment de l'organisme B (l'hôte) causant suffisamment de dommages pour nuire à l'épanouissement de ce dernier et pouvant entraîner sa mort.

Le bénéfice d'une telle association est donc unilatéral et au profit du parasite. Ce dernier y trouve une source de nutriments, une protection ou un transport et réalise tout ou partie de son cycle de développement associé à l'hôte.

L'amensalisme repose sur le principe de nuisance d'un organisme A sur un organisme B sans réciprocité.

Lorsqu'il s'agit d'une lutte chimique, l'amensalisme est appelé **antibiose** et est relativement répandue chez les organismes sessiles.

Interactions neutres

Les organismes A et B peuvent dans certains cas cohabiter sans bénéfice ni dommage évidents au premier abord. Il s'agit de **neutralisme**.

Interactions positives

Les organismes A et B peuvent cohabiter sans effet délétère pour aucun des protagonistes. Il s'agit alors de **coopération** si l'interaction est favorable pour au moins l'un d'entre eux .

Deux types de coopération existent :

- le **commensalisme** lorsque le bénéfice est unilatéral et le mutualisme s'il est réciproque.

- La **symbiose**, quant à elle, est un cas particulier de mutualisme entre deux organismes interagissant de manière spécifique, intime et obligatoire.

Dans ce dernier cas, un rapprochement physique est généralement observé et dans certains cas, jusqu'à l'internalisation d'un des deux protagonistes appelé endosymbionte.

b. La description mécaniste des interactions

En se basant sur les mécanismes biologiques impliqués, on distingue les interactions directes des interactions indirectes (Figure).

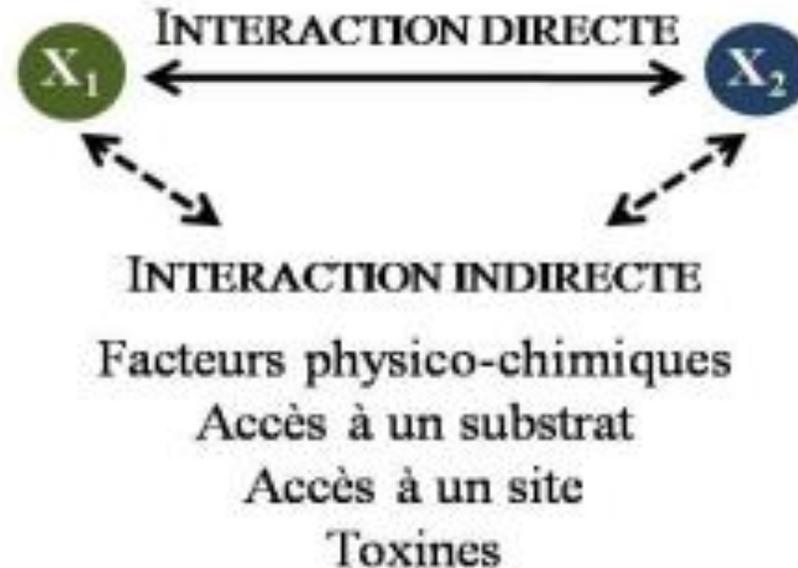
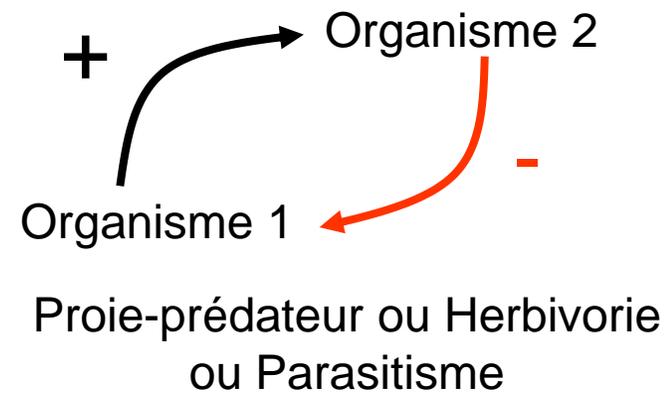
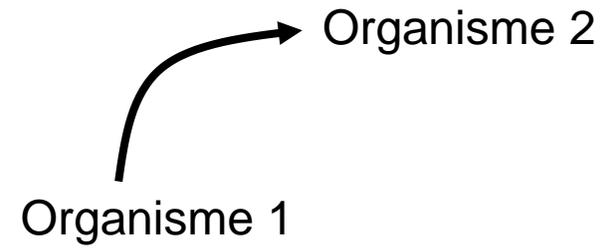
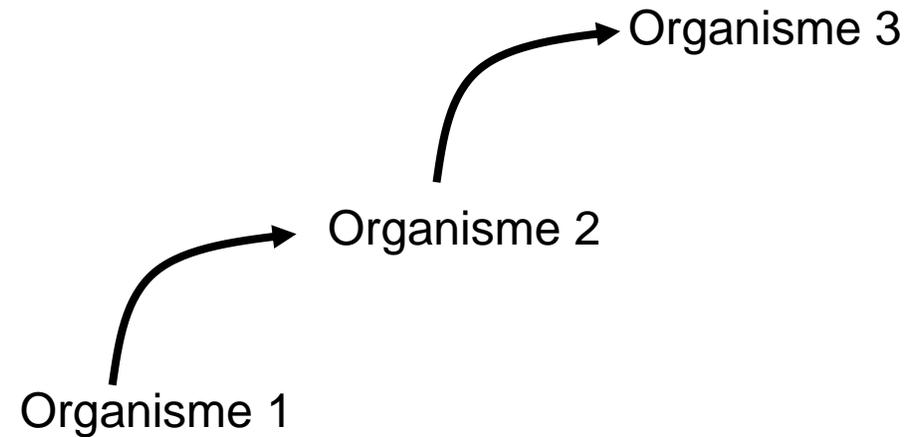


Figure : Schéma représentant la classification mécaniste des interactions biotiques pouvant s'établir entre deux ou plusieurs individus d'espèces identiques ou différentes dans un écosystème donné

Les interactions directes impliquent obligatoirement un contact physique entre les individus ou populations concernés: Cas du parasitisme et de la prédation.



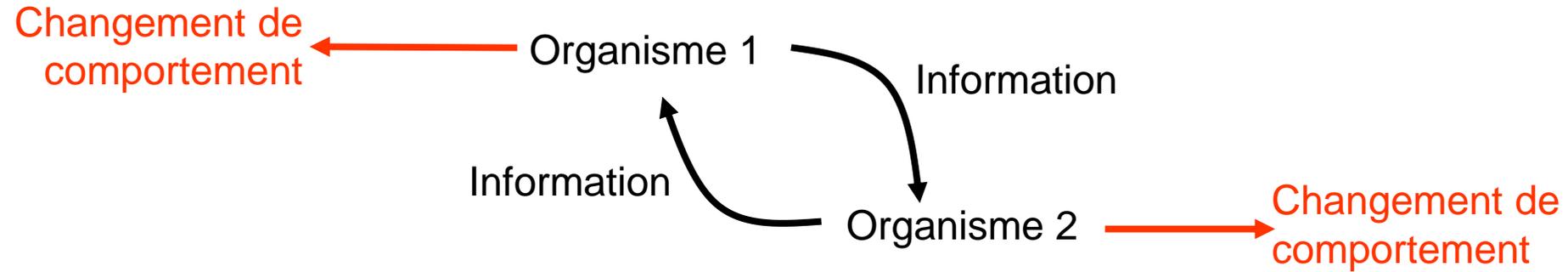
Les interactions indirectes sont, quant à elles, réalisées via une modification du biotope comme par exemple la variation de ses paramètres physico-chimiques.



Une majorité de ces interactions indirectes font intervenir la **production d'une substance particulière**.

- Si cette substance n'apparaît pas métabolisable par une des populations présentes dans l'écosystème donné et qu'elle a un effet positif ou négatif sur la croissance d'une de ces populations alors il s'agira d'une interaction de type « **interférence** ».
- Si cette substance apparaît comme un substrat du métabolisme d'au moins une des populations présentes alors il s'agira d'une interaction dite « **trophique** ».

Signalisation



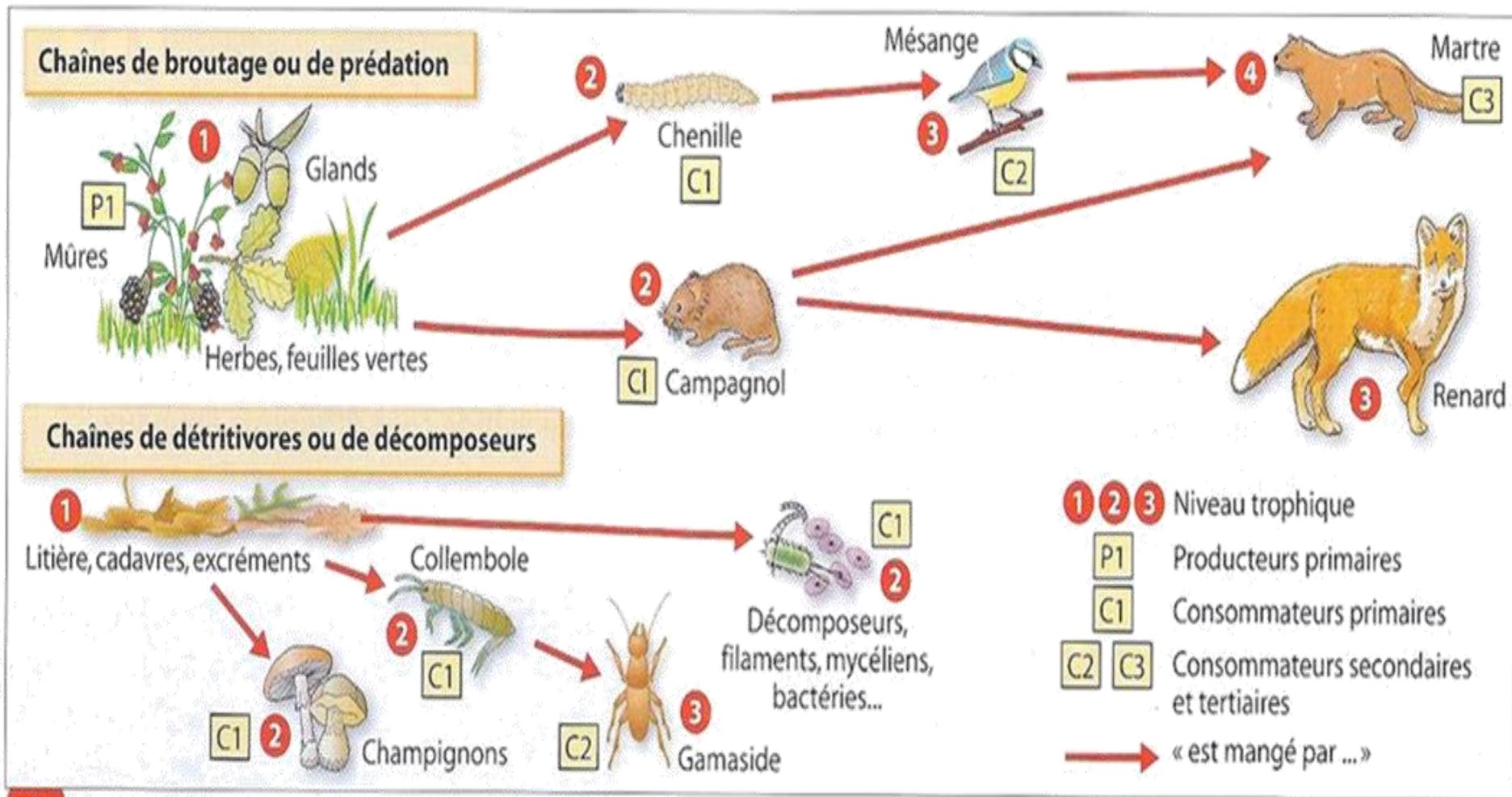
- En premier lieu seulement échange d'information (pas d'énergie ou de matière)
- Cela peut conduire à tout type de relation Symbiose, prédation, parasitisme...

Les réseaux trophiques

Selon leur **principale source de nourriture**, les espèces présentes dans un écosystème se répartissent en niveaux trophiques dépendant tous de celui des **producteurs primaires** ou organismes autotrophes.

La plupart de ces producteurs sont des organismes **photosynthétiques** qui, à l'aide de l'énergie lumineuse, synthétisent des glucides et d'autres composés organiques qui serviront de combustible à leur respiration cellulaire et de matériaux à leur croissance.

Tous les autres organismes d'un écosystème sont des **consommateurs**, ou hétérotrophes, qui se nourrissent directement ou indirectement de produits issus des producteurs primaires.

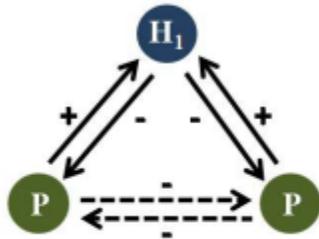


A Deux réseaux trophiques de l'écosystème « forêt de feuillus tempérée ».

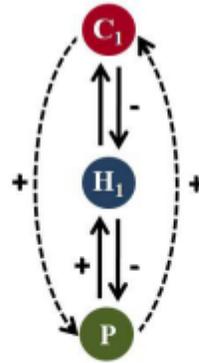
Ces organismes se décomposent en différents niveaux trophiques :

- Les **consommateurs primaires**, généralement appelés herbivores qui se nourrissent des producteurs primaires et/ou des produits de leur métabolisme.
- Les **consommateurs secondaires** et plus, généralement appelés carnivores qui se nourrissent des consommateurs primaires et/ou des produits de leurs métabolismes.

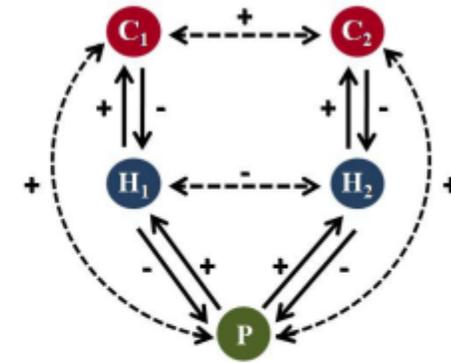
L'ensemble de ces organismes s'organisent donc en un réseau représentant les différents liens trophiques qui les unissent et mettant en évidence des interactions indirectes par interférences (Figure).



Interactions dans un réseau trophique comprenant deux producteurs et un consommateur



Interactions dans un réseau trophique comprenant un producteur primaire, un consommateur primaire et un consommateur secondaire



Interactions dans un réseau trophique comprenant un producteur primaire et plusieurs consommateurs primaires et secondaires

Figure : Schéma représentant différents **réseaux trophiques** ainsi que les **interactions directes** (représentées par les flèches continues) et **indirectes** (représentées par les flèches discontinues) s'établissant entre les différents organismes qui composent les différents niveaux trophiques :

producteurs primaires (P),
consommateurs primaires (H) et
consommateurs secondaires (C).

Interactions entre les microorganismes, les plantes et le milieu

Les interactions entre les microorganismes, les plantes et le milieu sont **complexes** et **récioproques**.

Les microorganismes interagissent entre eux. Ces interactions peuvent **être influencées par les conditions extérieures** (température, humidité, pH, ...) qui peuvent déplacer les équilibres vers l'un ou l'autre des microorganismes.

Ceux-ci peuvent également **agir sur les conditions extérieures** par exemple en influençant le pH du milieu, en modifiant la structure du sol ou en minéralisant la matière organique.

D'autre part, les plantes poussant dans le sol sont bien évidemment influencées aussi bien par le milieu que par les microorganismes.

1. Actions des microorganismes sur le milieu

Les microorganismes agissent à divers niveaux sur leur milieu :

- Ils jouent des rôles essentiels dans les **cycles des éléments nutritifs** et dans la **formation de l'humus**.
- Ils sont également primordiaux pour la **biodégradation** des produits étrangers **xénobiotiques** comme les pesticides.

L'effet des microorganismes du sol sur la structure du sol est également très important :

- Grâce aux **liants** qu'ils produisent et aux **hyphes** des champignons qui agissent comme un filet, **la structure du sol peut être nettement améliorée et stabilisée**. Ceci a un **effet positif sur l'aération** du sol et sur son équilibre hydrique, et d'autre part **protège le sol contre l'érosion**.

Certains microorganismes sont également capables de **modifier le pH** du sol, ce qui **influence la solubilité de certains éléments nutritifs**.

2. Actions du milieu sur les microorganismes

Les microorganismes sont fortement dépendant et ainsi influencés par la régulation des disponibilités en **eau** et en **oxygène** du sol.

De manière générale, l'activité microbienne diminue avec la disponibilité de l'eau, les bactéries étant plus sensibles que les champignons; toutefois, il existe de fortes variations selon les groupes taxonomiques.

La **réhumectation** d'un sol sec entraîne une rapide reprise de l'activité microbienne qui est pendant quelques temps très intense et se traduit par une forte minéralisation du carbone et de l'azote organique.

Dans le cas d'une submersion du sol, les équilibres biologiques sont fortement bouleversés :

- Les champignons régressent et les bactéries prennent le dessus.
- Si la situation se prolonge, une situation anaérobie apparaît, ce qui provoque, en plus d'une asphyxie des racines et une diminution des microorganismes aérobies, l'apparition de diverses substances toxiques.

Le **pH** du sol a également une influence sur la vie microbienne.

Les champignons sont généralement dominants dans les sols acides et les bactéries dans les sols neutres ou alcalins.

Cependant, le pH optimal pour les diverses phases de croissance (par exemple germination des spores et croissance mycélienne) d'un organisme peut varier.

L'influence du pH est particulièrement importante pour divers agents pathogènes.

Ainsi, l'agent pathogène de la gale argentée de la pomme de terre n'est dangereux qu'en sol alcalin, alors que celui de l'hernie du chou ne cause des dégâts importants que dans les sols acides.

Les **argiles**, grâce à leur effet structural, leur effet tampon et leur effet réservoir, jouent un rôle important pour la vie microbienne. Plus leur capacité d'échange est élevée, leur surface développée plus grande et leur aptitude à gonfler en présence de l'eau est importante, plus ce rôle est marqué.

Ainsi, l'activité biologique de la montmorillonite est plus importante que celle de la kaolinite. Ils agissent aussi bien sur la quantité des microorganismes et sur leur activité.

Les argiles et leur nature jouent un rôle important sur le pouvoir infectieux de divers pathogènes.

Classification des constituants d'un sol en fonction de leur granulométrie



Terre fine	Argile	Particules de moins de 2 μm
	Limons fins	2 à 20 μm
	Limons grossiers	20 à 50 μm
	Sables fins	50 μm à 200 μm
	Sables grossiers	200 μm à 2 mm
Eléments grossiers	Graviers	2 à 20 mm
	Cailloux	2 à 7,5 cm
	Pierres	7,5 à 20 cm
	Blocs	> 20 cm

Triangle des textures

Texture argileuse



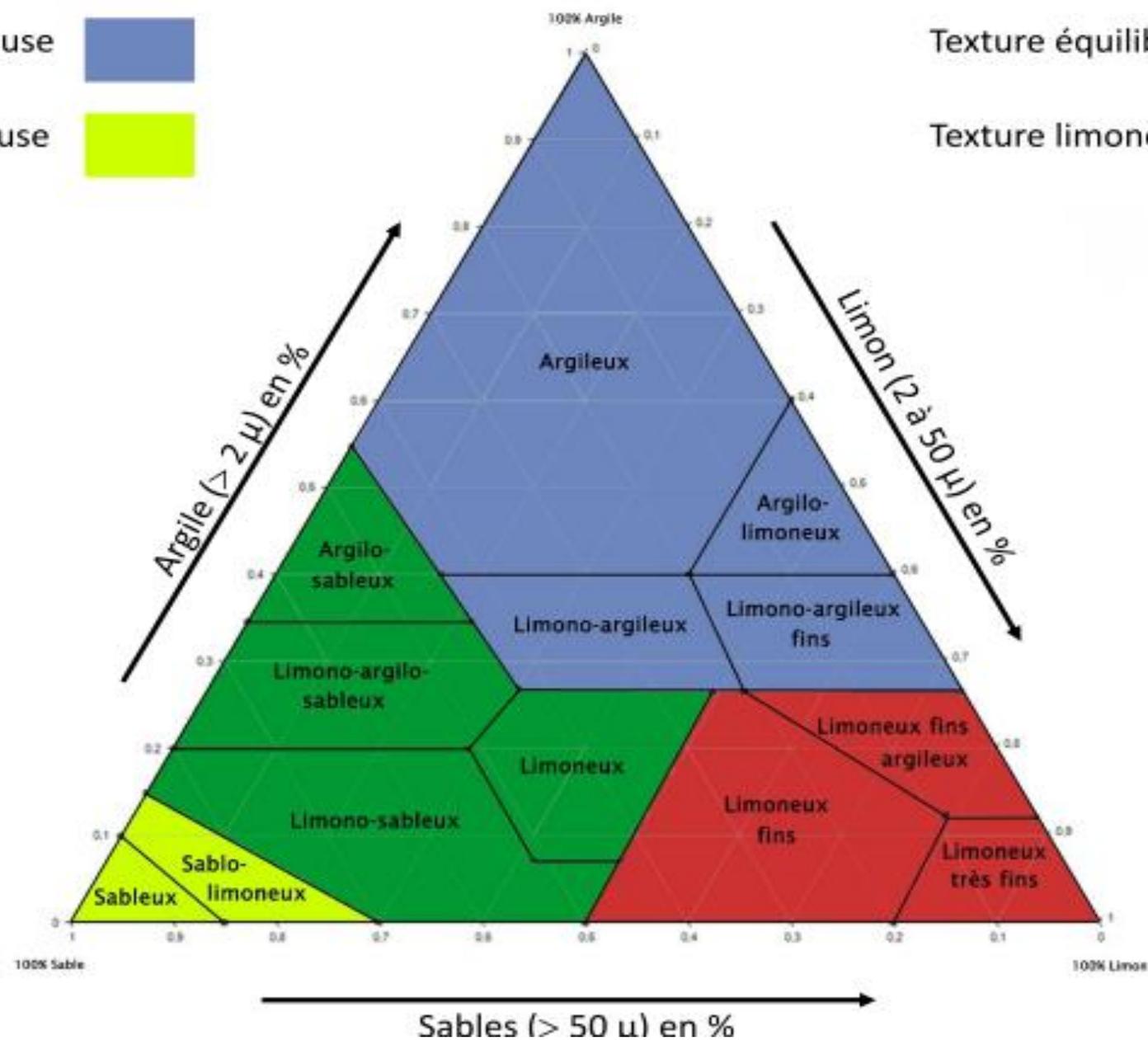
Texture sableuse



Texture équilibrée



Texture limoneuse



La **température** joue également un rôle important sur les équilibres microbiens du sol, tous les microorganismes n'ayant pas les même optimums.

On ne peut certes pas influencer la température qui règne dans les champs, mais tenir compte des conditions climatique lors du choix de microorganismes auxiliaires et de leur application peut augmenter les chances de succès.

La **fertilisation** du sol peut également influencer fortement les équilibres microbiologiques du sol. Suivant les engrais azotés apportés, on peut influencer par exemple le pH de la rhizosphère.

Le développement de certains champignons pathogènes du sol peut être inhibé avec une fertilisation azotée amenée sous forme ammoniacale ou d'urée.

Certains microéléments jouent un rôle important dans les interactions entre microorganismes, comme le fer.

Les composés xénobiotiques, c'est à dire qui n'existent pas à l'état naturels (comme les pesticides), influencent, de manière voulue ou non, les équilibres microbiens dans le sol.

Après l'emploi d'un tel produit, on observe tout d'abord un effet dépressif sur l'activité des populations microbiennes, **effet négatif** qui ensuite disparaît avec le temps.

Le temps de rétablissement de l'activité microbienne est une valeur très importante pour juger de l'effet de ces produits.

3. Les plantes entre les microorganismes et le milieu

Les racines modifient physiquement le sol en poussant dans les fentes et dans les zones de faible résistance.

On néglige trop souvent **l'importance et le rôle des résidus racinaires** dans le sol.

Par exemple :

- **Dans une prairie**, environ 50 - 60% de la production nette de biomasse sont racinaires.
- **En terre arable**, la masse de racines restant dans le sol après une récolte de céréales représente environ 15 – 40 % de la masse de la récolte en grains. Ce qui peut signifier un apport en Matière Organique d'environ 3 t/ha selon le type de céréale.

LA RHIZOSPHERE

Les plantes ont une **action directe** sur les microorganismes du sol de part les substances diverses «**exsudats**» qu'elles sécrètent dans le sol, principalement au niveau de la **rhizosphère**. Ces substances influencent et sont influencées par le milieu et par les microorganismes du sol.

On appelle **rhizosphère** la zone d'environ **2 mm** autour de la surface extérieure de la racine.

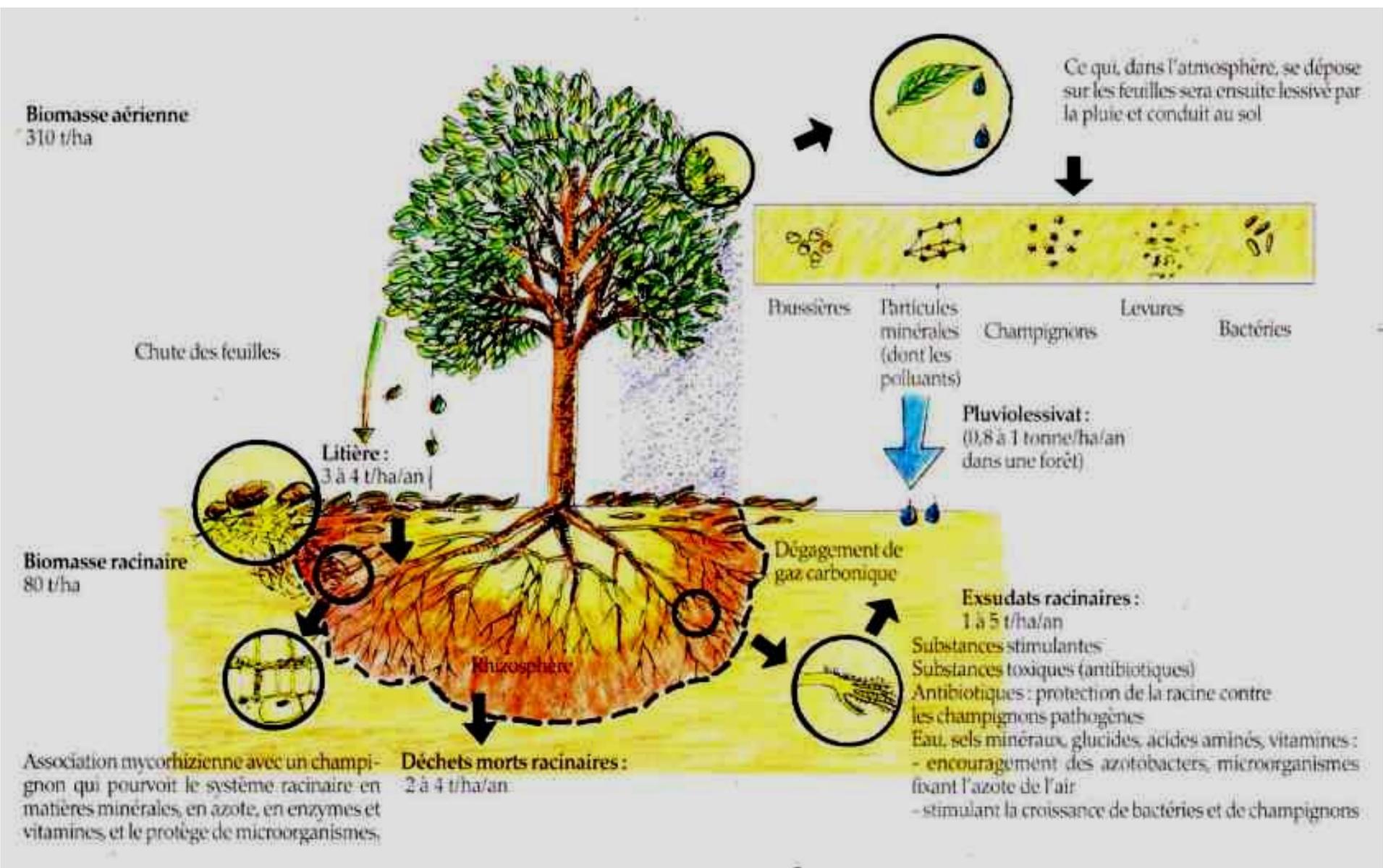
Les caractéristiques chimiques et biologiques de cette zone peuvent être très différentes de la zone de sol adjacente.

On appelle **rhizo-déposition** le relargage par les racines de substances organiques :

i) de **bas poids moléculaire** (acides organiques, sucres, acides aminés, composés phénoliques et facteurs de croissance) et

(ii) de **haut poids moléculaire** (mucilages, débris cellulaires) qui forment le mucigel avec son cortège de microbes.

Le nombre de microorganismes dans la rhizosphère est de ~ 10 fois supérieur à celui de la zone de sol adjacente.



1. La rhizosphère et l'effet rhizosphère

La rhizosphère est la région du sol directement influencée par les racines. Elle représente le lieu d'échange essentiel entre la plante et le sol. On y observe une présence importante de microorganismes liés les uns aux autres par de complexes réactions de guerre et de paix.

On observe souvent dans la rhizosphère une quantité de microorganismes au moins 1000 fois plus importante que dans le sol ambiant non influencé par les racines.

Cette population importante de microorganismes dans la rhizosphère est due aux substrats énergétiques abondants qui s'y trouvent. Une fraction importante de la matière produite par la photosynthèse est émise par les racines sous forme de:

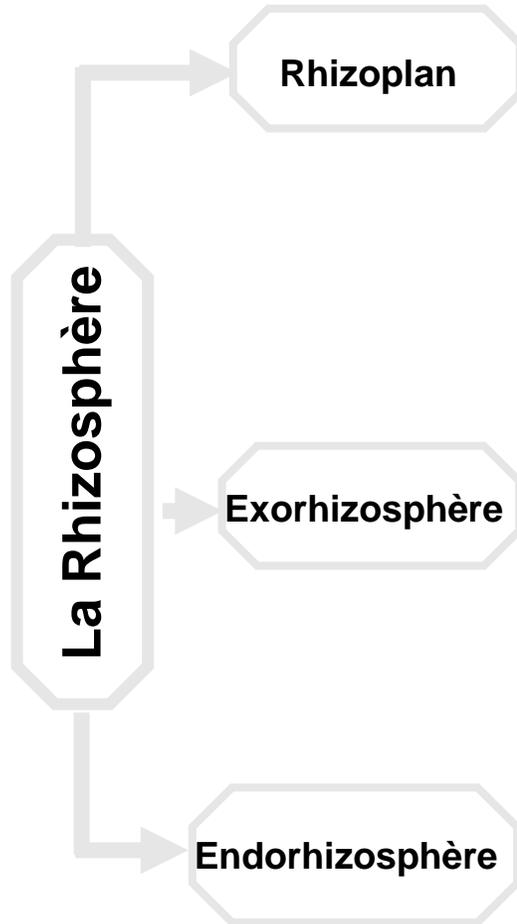
exsudats: diffusion passive hors des cellules de composés solubles de faible poids moléculaire, comme sucres ou acides aminés

sécrétions et excrétions: processus actif consommant de l'énergie ; concernent généralement des composés de **poids moléculaires élevés**, comme **enzymes** ou **mucilages**. Les cellules peuvent également excréter activement des **protons** ou des **acides organiques** pour maintenir leurs équilibres ioniques

cellules mortes et lysats: Ces cellules desquamées représentent un apport parfois très important de matière organique.

On trouve dans ces produits une grande quantité de carbone organique, source d'énergie pour les microorganismes.

STRUCTURE DE LA RHIZOSPHERE



Interface sol/racine. C'est une zone constituée par la rhizosphère des racines et le mucigel et dont la microflore est extraite par agitation rigoureuse des racines préalablement lavées.

- Les polysaccharides constituant le mucigel sont synthétisés par l'appareil de Golgi et leur colonisation par les MO est encore mal connu. Certaines bactéries disposent de l'équipement enzymatique, leur permettant de l'envahir (mucigel) en l'utilisant comme substrats, alors que d'autres en sont dépourvus et sont donc éliminés.
- Le mucigel constituerait une niche parfaitement favorable à la multiplication des RHIZOBIA et serait le site d'accumulation d'une partie des exsudats racinaires.

Sol adhérent au système racinaire : définit la fine couche du sol qui adhère aux racines, à l'intérieur de laquelle diffusent les exsudats solubles et volatiles en provenance des racines. Cette fine couche reste fermement attachée aux racines après agitation vigoureuse.

Rhizosphère interne: C'est une zone constituée par les cellules du cortex racinaire, envahies par les MO saprophytes.

- Les observations ultramicroscopiques ont montré clairement que les MO saprophytes du sol colonisent non seulement la surface des racines vivantes, mais aussi leur épiderme et les tissus corticaux sans qu'aucun symptôme de maladie ne se manifeste chez la plante-hôte.

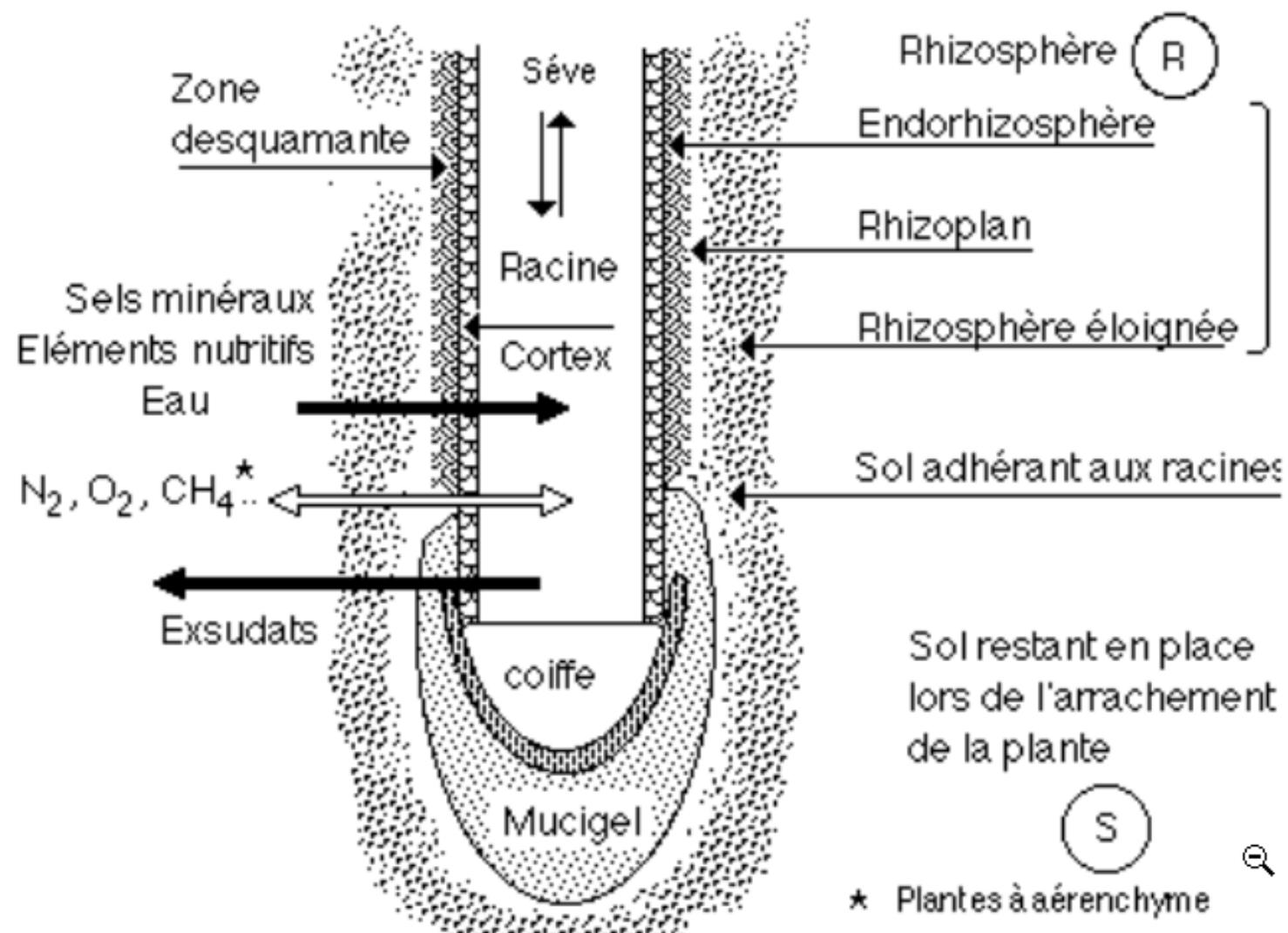
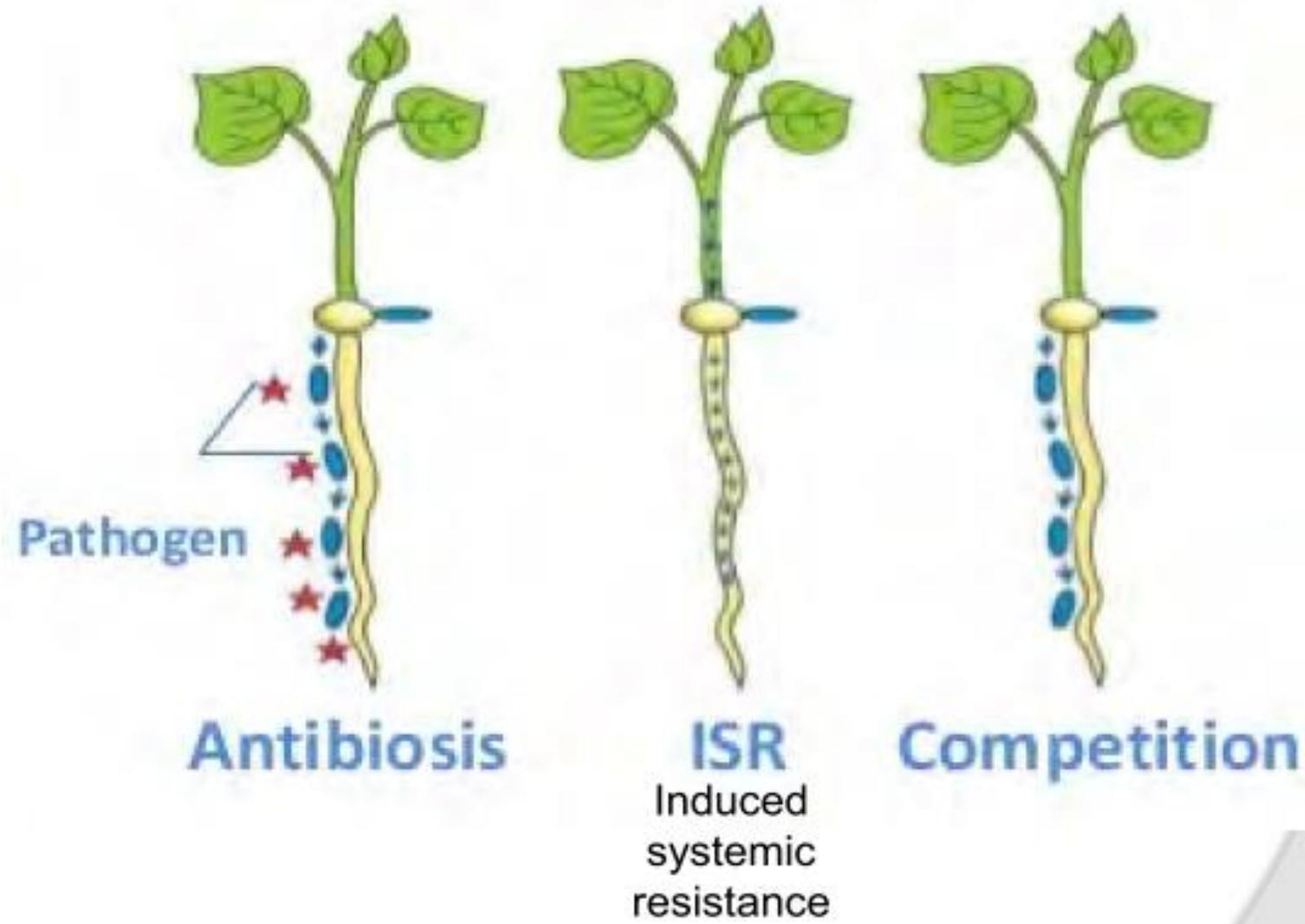
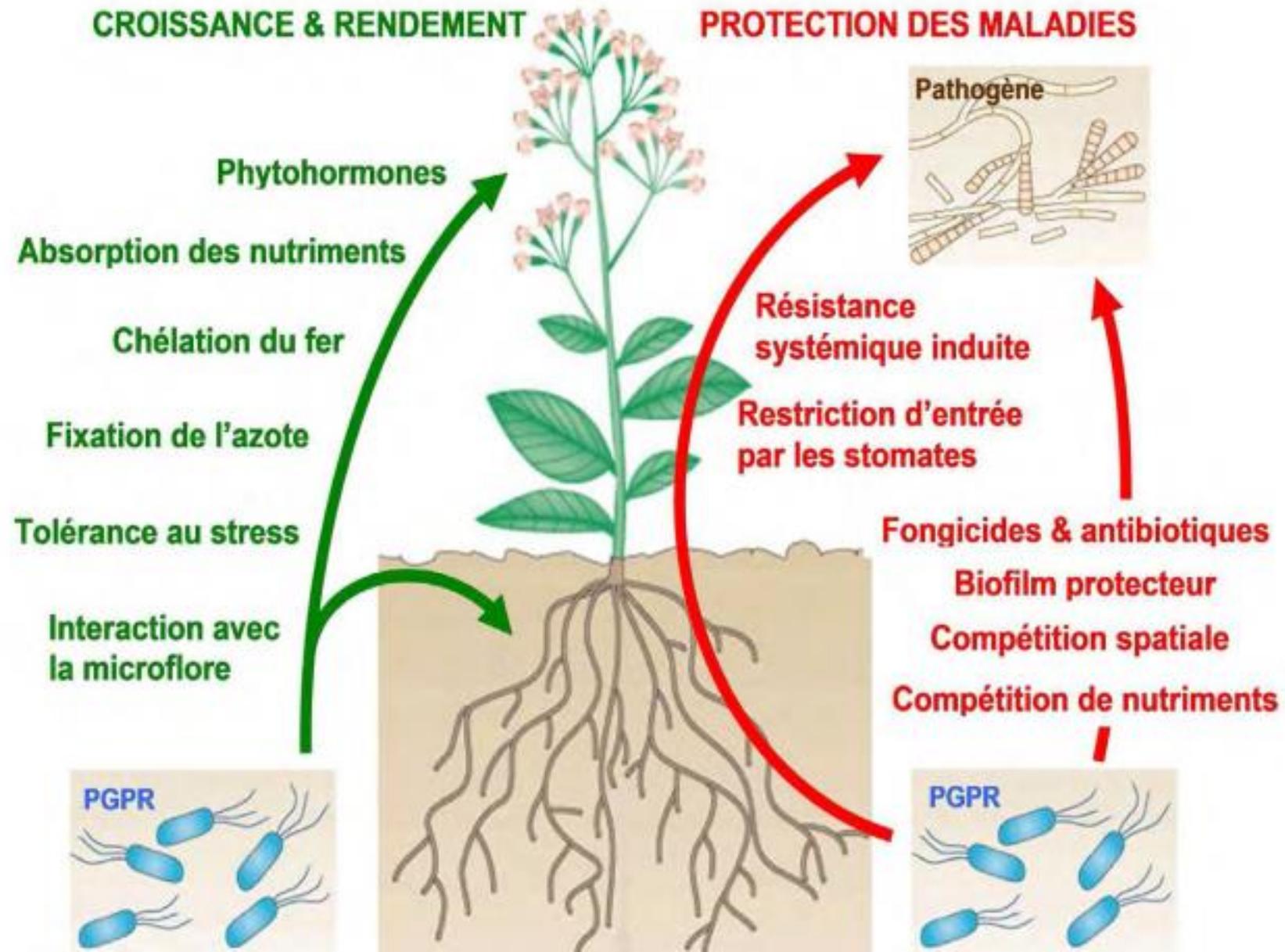


Fig. 7.1. Schéma de la rhizosphère

Rhizobactéries promotrices de croissance des plantes



Mécanismes d'action des PGPR





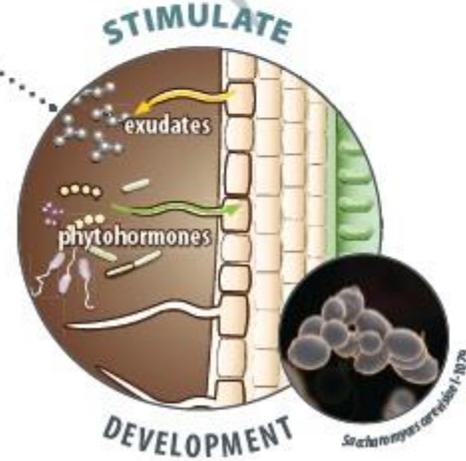
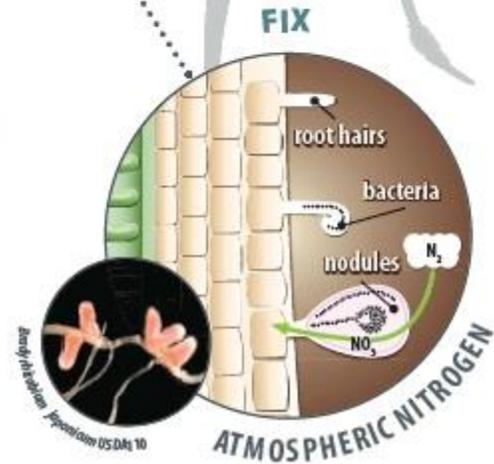
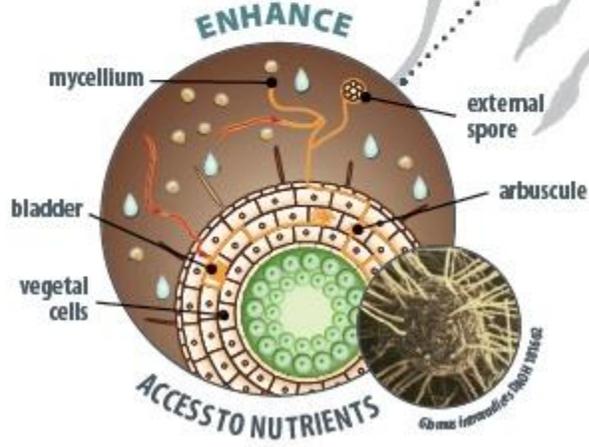
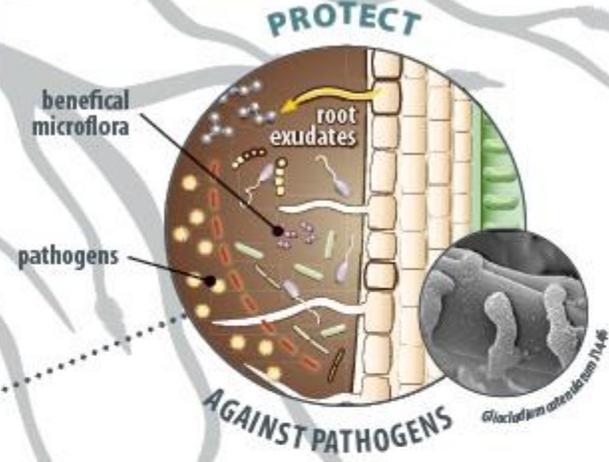
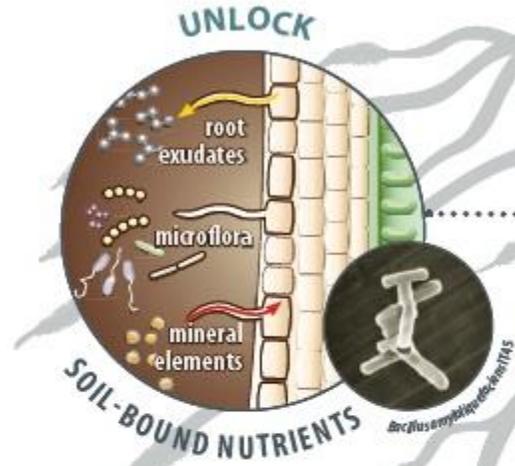


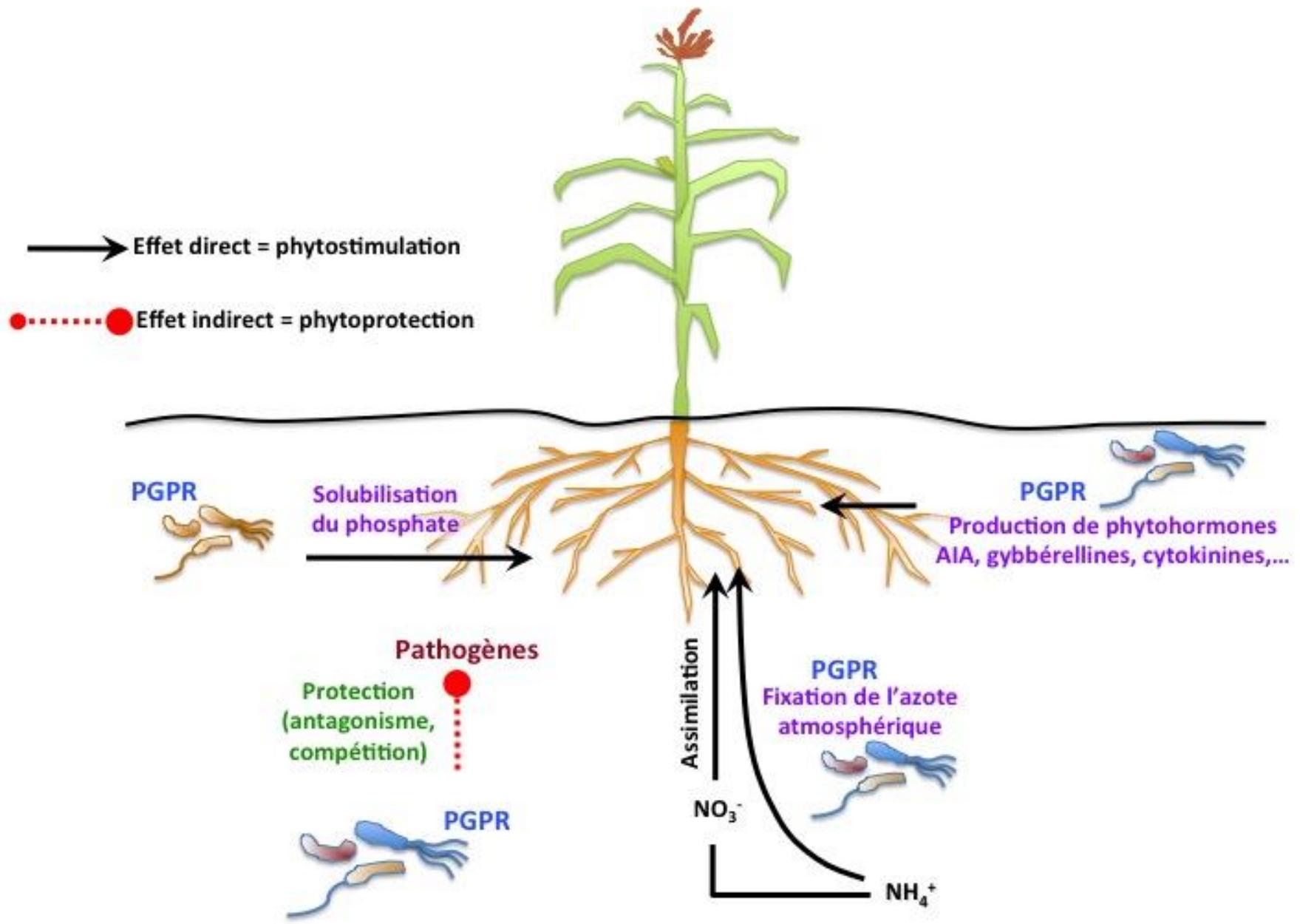






THE CROP PARTNERS





**INTERACTIONS
dans la
rhizosphère**

La symbiose

Relation permanente entre deux organismes d'espèces différentes et qui se traduit par des effets bénéfiques : l'un fournissant à l'autre certaines substances

La pathogénicité

Lorsque la présence d'un être vivant devient néfaste pour un autre et va jusqu'à le rendre malade

La mycorhize

(du grec myco ; champignon et rhiza ; racine) est le résultat de l'association symbiotique entre des champignons et les racines des plantes.

L'allélopathie

interactions chimiques directes ou indirectes, positives ou négatives, d'une plante sur une autre (y compris les microorganismes) avec des molécules

Le parasitisme

Certains organismes vivent au dépend d'autres organismes. On dit qu'ils sont des parasites.

Les substances libérées par les racines **varient** aussi bien **quantitativement** que **qualitativement** d'une variété **de plante à l'autre**, et elles sont également facteurs de l'état physiologique de la plante.

Elles sont fortement **influencées** par tous les facteurs influençant l'activité photosynthétique et la croissance de la plante: **lumière, température, teneur en eau du sol, structure du sol, nutrition, maladies** et autres stress, ...

Des **herbicides, antibiotiques** ou engrais solubles pulvérisés sur le feuillage peuvent également être partiellement transférés dans les racines et apparaître dans la rhizosphère ou **modifier la nature des exsudats**.

Les microorganismes de la rhizosphère

L'**activité microbiologique** dans la rhizosphère est de grande importance et a diverses conséquences pour les plantes.

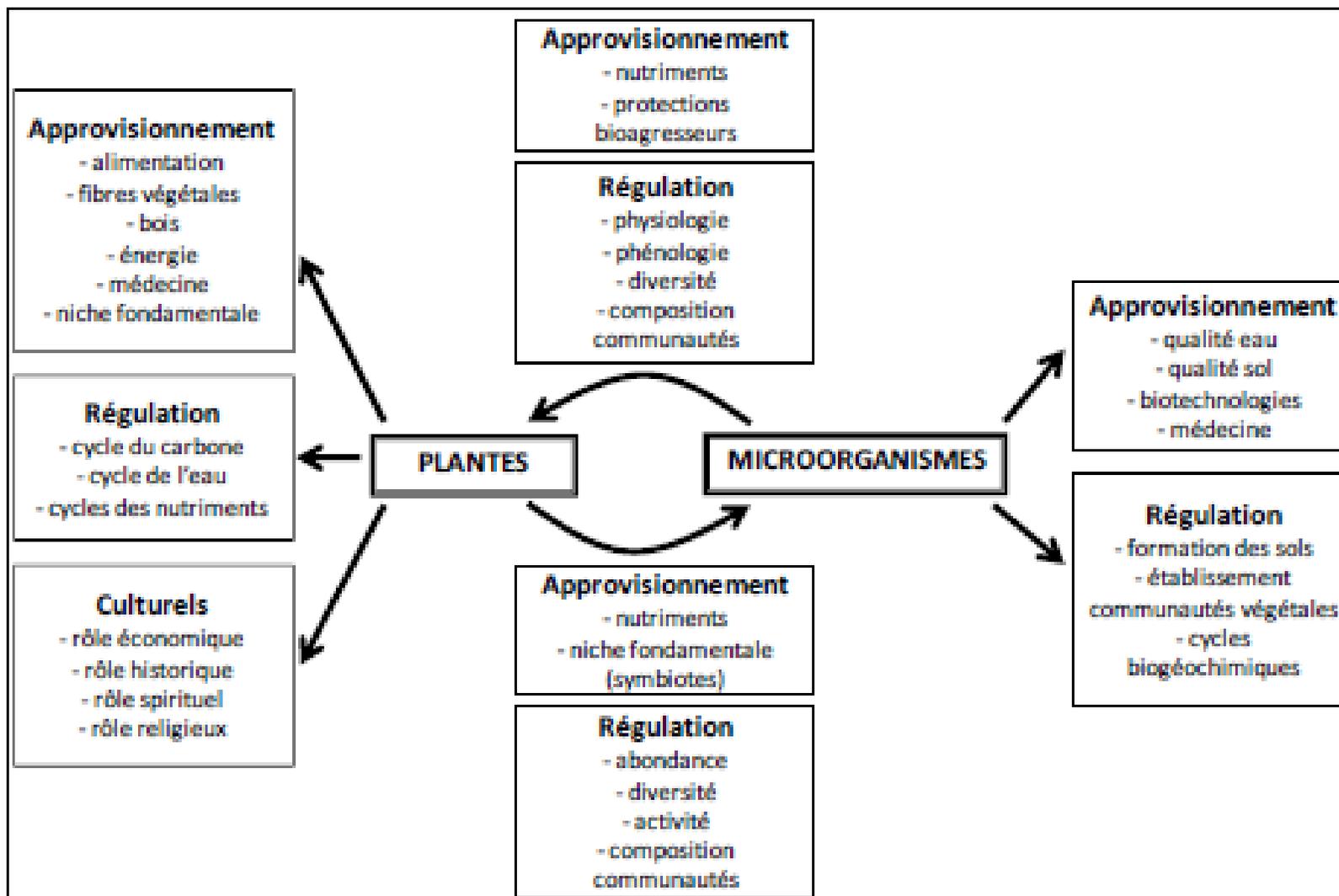
ils jouent un rôle important dans **le recyclage des éléments minéraux**, entraînant alors presque toujours leur meilleure assimilation par les plantes.

D'autre part, de part la respiration des racines et des microorganismes qui consomment de grandes quantités d'oxygène, elle provoque une diminution du potentiel d'oxydo-réduction, ce qui peut favoriser l'absorption de certains cations par les plantes, tels le fer et le manganèse.

Les sidérophores, agents chélateurs synthétisés par les microorganismes, peuvent également favoriser ou freiner l'assimilation d'éléments comme le fer, le manganèse et le zinc.

Certains microorganismes produisent également des régulateurs de croissance qui peuvent influencer le métabolisme de la plante.

La production de composés toxiques par certains microorganismes ou la capacité de détoxification par exemple de composés phénoliques par d'autres peuvent directement agir positivement ou négativement sur la physiologie de la plante.



Services écosystémiques rendus par les plantes, les microorganismes telluriques et leurs interactions.

Réacteurs biologiques

Les réacteurs biologiques sont des dispositifs permettant la croissance de microorganismes (Fig.). Ils constituent des **microcosmes** contrôlés dont les flux de matière à l'entrée et à la sortie sont maîtrisés.

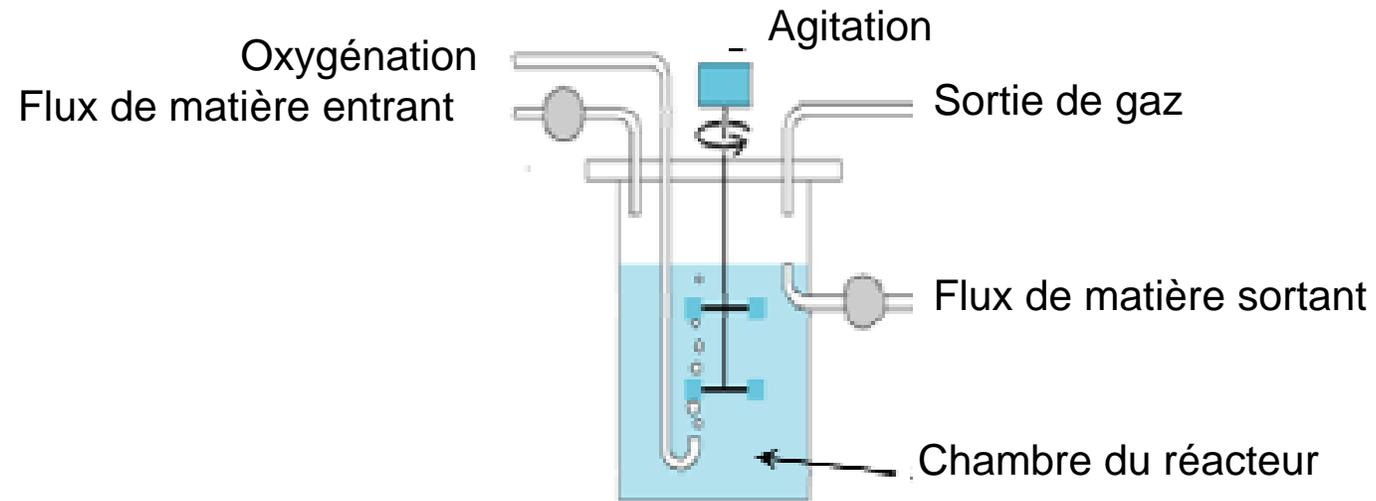


Figure : Schéma d'un réacteurs biologiques

Plusieurs composants peuvent être distingués dans un réacteur biologique :

1- Les substrats : ceux qui sont nécessaires à la croissance des microorganismes (flux de matière entrant).

Pour permettre la croissance, le milieu de culture contenu dans la chambre du réacteur doit contenir tous les éléments nécessaires.

En général, nombre de ces éléments sont ajoutés en excès de manière à ce qu'ils ne limitent pas la croissance.

2- Les organismes : peuvent être de nature très différente comme des bactéries, du phytoplancton, des champignons, des levures...

La majorité des procédés biologiques développés à l'échelle industrielle utilisent des cultures microbiennes composées d'une seule espèce de micro-organisme (culture pure).

Concernant les procédés de **dépollution**, il s'agit principalement de microorganismes issus d'un **écosystème complexe** qui peut donc compter jusqu'à plus d'une centaine d'espèces.

3- Les **produits** des réactions biochimiques synthétisés par les micro-organismes : Ces composés sont utilisés dans divers domaines de l'industrie : agro-alimentaire (huiles, fromage, bières, vins...), chimique (solvants, enzymes, colorants...), pharmaceutique (antibiotiques, hormones, vitamines...) également pour la production de bio-énergie (éthanol, biogaz...).

Dans les études **écologiques**, ces composés permettent de **suivre l'activité des micro-organismes** en relation avec d'autres paramètres tels que les conditions opératoires (température, pH...) ou encore les interactions liant les espèces entre elles...

4- Les catalyseurs qui ne sont ni produits ni consommés au cours de la réaction mais qui sont nécessaires pour qu'elle puisse avoir lieu.

Réacteurs biologiques discontinus

En mode discontinu (ou « batch »), le réacteur biologique est fermé et garde un volume constant en l'absence d'entrée et de sortie de matière.

Les espèces sont introduites à l'instant initial (inoculation) ainsi que les nutriments et les précurseurs nécessaires.

L'avantage de cette approche est qu'elle limite la contamination par d'autres micro-organismes et permet donc de rester plus longtemps dans des conditions axéniques.

Un **inconvé**nient majeur est que les moyens d'action sur de tels systèmes sont limités.

En effet, l'absence de renouvellement de la culture restreint les possibilités d'échantillonnage à moins d'utiliser des enceintes de très grand volume qui s'avèrent peu pratiques. De plus, les substrats du milieu s'épuisant au cours du temps et engendrant des modifications physico-chimiques, l'identification des causes de changement démographique des espèces présentes est rendue difficile.

Du fait de leur simplicité, les réacteurs biologiques en batch sont les plus utilisés dans l'industrie notamment en vue de la production d'un métabolite ou de biomasse.

Le réacteurs biologiques semi-discontinus

De même que dans le cadre des réacteurs biologiques fermés (batch), la durée d'une expérience dans un réacteur semi-continu est limitée. En effet, la culture est ici alimentée de son volume de départ V_0 jusqu'à son volume final V_f à l'instant final t_f . Ainsi, s'il y a flux entrant de matière dans les réacteurs semi-continus, la sortie est nulle durant le temps de l'expérience.

Ce mode de fonctionnement permet un meilleur contrôle des conditions de croissance, le réacteur étant le plus souvent alimenté par un débit contrôlé en boucle fermée.

Le réacteurs biologiques continus

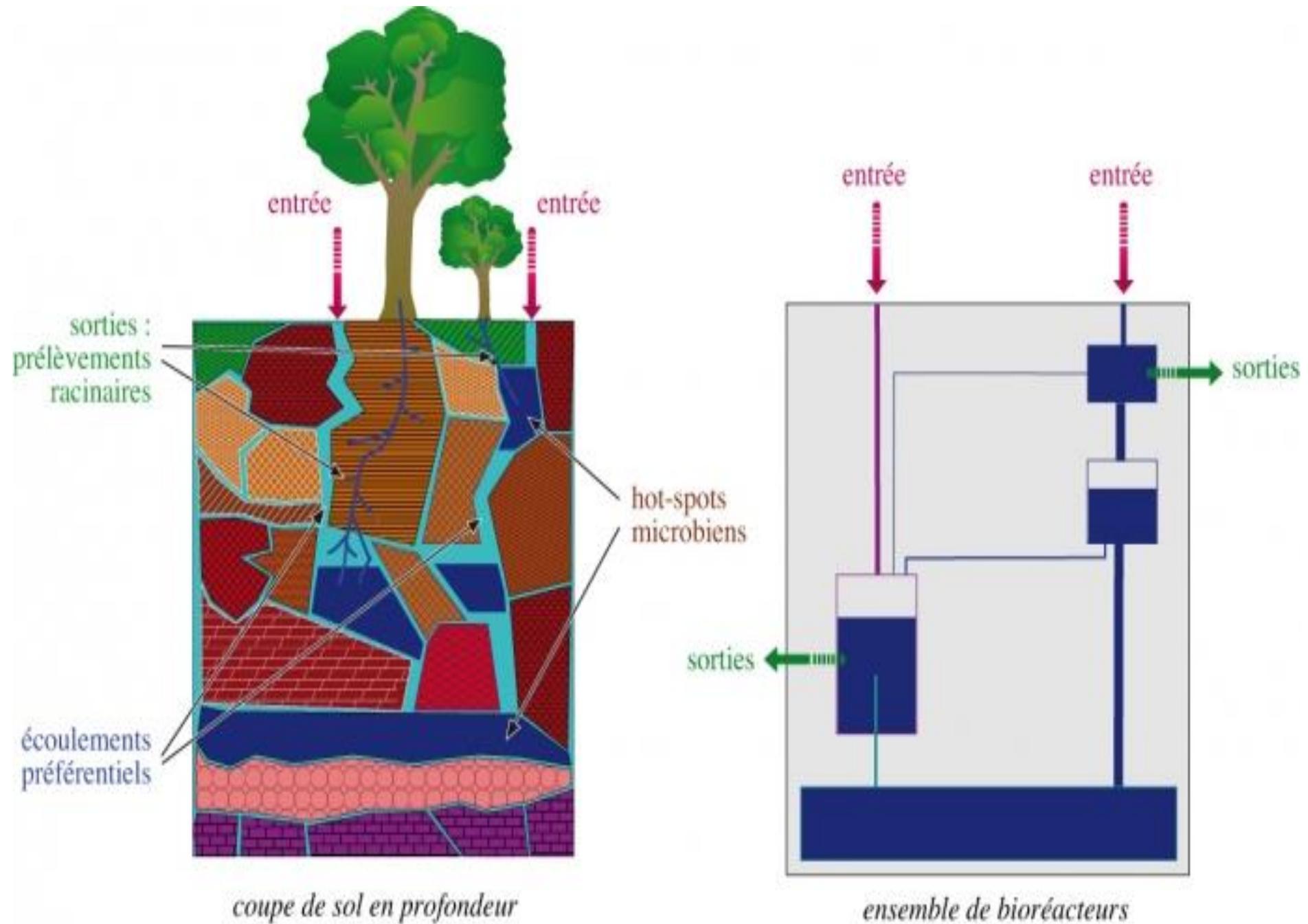
Le fonctionnement en continu des réacteurs biologiques est le plus largement répandu dans le domaine de la dépollution biologique de l'eau.

Caractérisé par un volume constant dans la chambre du réacteur, le soutirage de milieu réactionnel (flux de matière sortant) est réglé de manière à être égal au flux d'alimentation en matière nutritive.

Ce mode de fonctionnement laisse une grande latitude pour appliquer des techniques de contrôle des procédés. De plus, il est possible de réaliser des prélèvements importants tout en limitant l'utilisation de grands volumes peu pratiques d'un point de vue expérimental.

Les réacteurs biologiques fonctionnant en régime continu sont également appelés «chémostats».

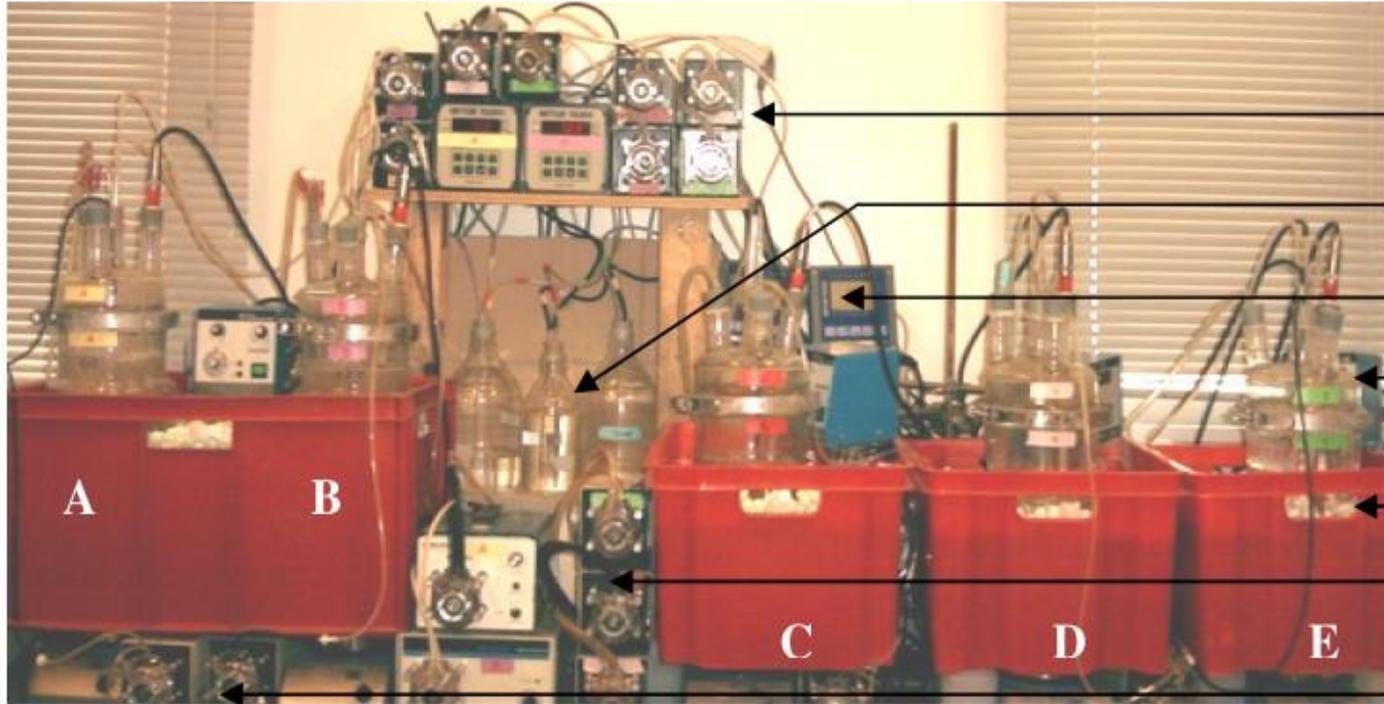
Les réacteurs biologiques en continu apparaissent comme des outils pertinents pour l'étude de la croissance des micro-organismes et de leurs interactions d'autant plus que les réactions s'y produisant peuvent être aisément modélisables.











Pompes régulation pH

Réserves acide et base

pH-mètre

Réacteur biologique

Bain thermostaté

Pompes de soutirage

Pompes d'alimentation



Une cuscute se déplaçant en direction d'un plant de tomate.







UGA2121072

L'ETAT VIABLE NON CULTIVABLE (VNC)

L'état dit « **Viable mais Non Cultivable** » (VNC) a été proposé pour la première fois en **1982**, par le laboratoire de **Rita Colwell** de l'université du Maryland. Cette équipe montra que des cellules de *Escherichia coli* et de *Vibrio cholerae* étaient toujours vivantes bien qu'incapables de se multiplier sur un milieu gélosé.

Pour être considérée comme **viables**, des cellules de levure devaient **conserver une intégrité membranaire, une activité enzymatique**, et la capacité à avoir une **activité métabolique**.

Viable mais Non Cultivable

=

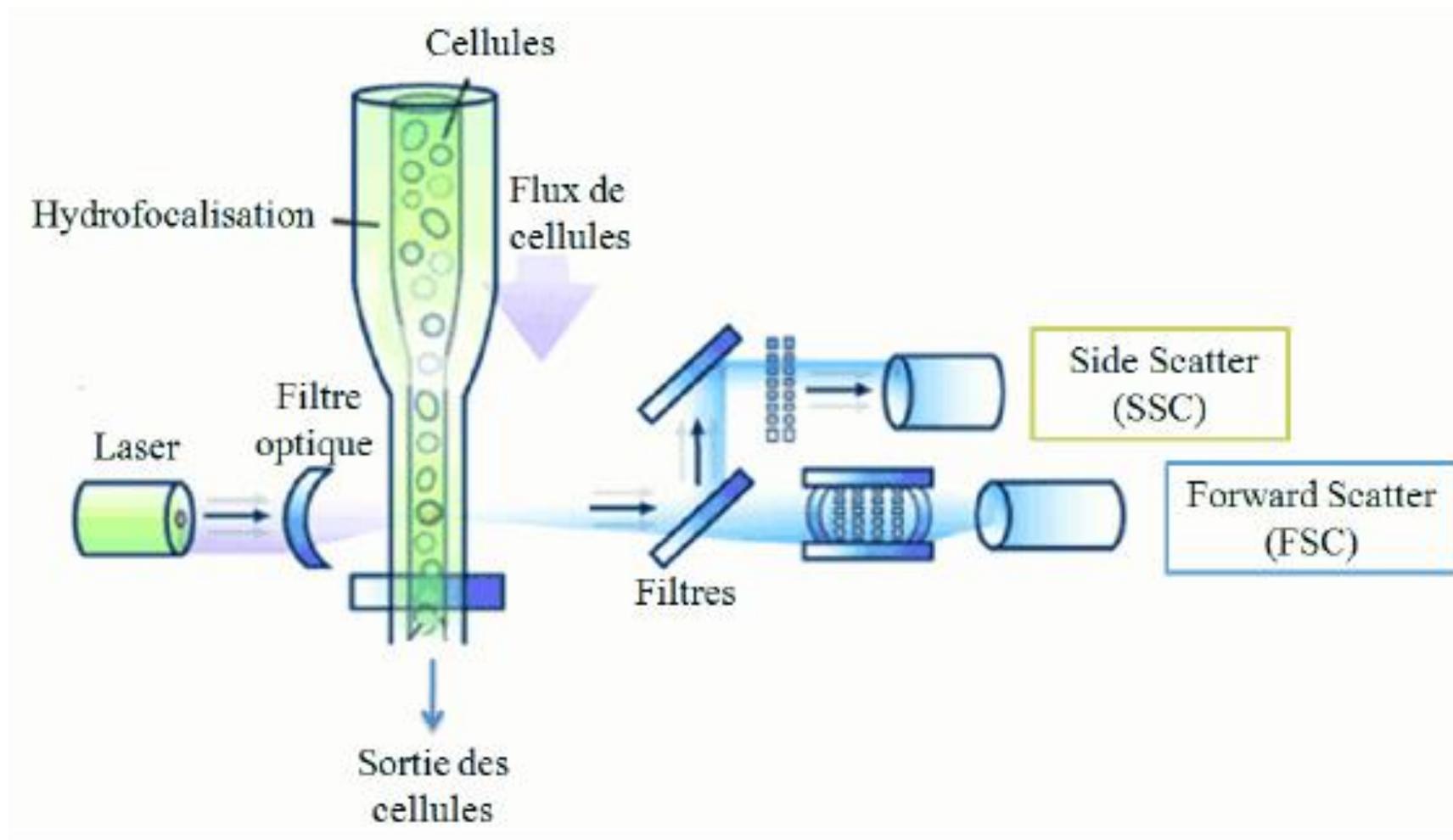
Un état physiologique

Une cellule bactérienne ne peut pas être cultivée via les milieux de culture conventionnels

Métabolisme active

une réponse de survie des bactéries exposées à des conditions de stress environnementaux (tels qu'une température très basse).

lorsque les conditions seront à nouveau favorables
Les bactéries peuvent revenir à l'état normal



Schém

En général, les cellules viables sont capables de former des colonies sur milieux gélosés.

Lorsqu'elles perdent cette capacité, elles sont alors usuellement considérées comme mortes.

Cet état métabolique particulier dit **VNC** décrit des cellules toujours actives métaboliquement, mais dans **l'incapacité de se multiplier**, notamment sur les milieux gélosés qui permettent leur quantification habituellement.

Cet état métabolique a été proposé comme une stratégie des cellules pour résister aux conditions environnementales difficiles

Liste de bactéries décrites comme entrant en état VNC

<i>Aeromonas salmonicida</i>	<i>Lactobacillus plantarum</i>	<i>Serratia marcescens</i>
<i>Agrobacterium tumefaciens</i>	<i>Lactococcus lactis</i>	<i>Shigella dysenteria</i>
<i>Alcaligenes eutrophus</i>	<i>Legionella pneumophila</i>	<i>S. flexneri</i>
<i>Aquaspirillum</i> sp.	<i>Listeria monocytogenes</i>	<i>S. sonnei</i>
<i>Burkholderia cepacia</i>	<i>Micrococcus flavus</i>	<i>Sinorhizobium meliloti</i>
<i>B. pseudomallei</i>	<i>M. luteus</i>	<i>Streptococcus faecalis</i>
<i>Campylobacter coli</i>	<i>M. varians</i>	<i>Tenacibaculum</i> sp.
<i>C. jejuni</i>	<i>Mycobacterium tuberculosis</i>	<i>Vibrio anguillarum</i>
<i>C. lari</i>	<i>M. smegmatis</i>	<i>V. campbelli</i>
<i>Cytophaga allerginae</i>	<i>Pasteurella piscida</i>	<i>V. cholerae</i>
<i>Enterobacter aerogenes</i>	<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	<i>V. fisheri</i>
<i>E. cloacae</i>	<i>P. fluorescens</i>	<i>V. harveyi</i>
<i>Enterococcus faecalis</i>	<i>P. putida</i>	<i>V. mimicus</i>
<i>E. hirae</i>	<i>P. syringae</i>	<i>V. natriegens</i>
<i>E. faecium</i>	<i>Ralstonia solanacearum</i>	<i>V. parahaemolyticus</i>
<i>Escherichia coli</i> (including EHEC)	<i>Rhizobium leguminosarum</i>	<i>V. proteolytica</i>
<i>Francisella tularensis</i>	<i>R. meliloti</i>	<i>V. shiloi</i>
<i>Helicobacter pylori</i>	<i>Rhodococcus rhodochrous</i>	<i>V. vulnificus</i> (types 1 et 2)
<i>Klebsiella aerogenes</i>	<i>Salmonella enteritidis</i>	<i>Xanthomonas campestris</i>
<i>K. pneumoniae</i>	<i>S. typhi</i>	
<i>K. planticola</i>	<i>S. typhimurium</i>	

Stress environnementaux provoquant l'entrée des bactéries en état VNC :

- la carence nutritionnelle
- osmotique
- oxygène
- la plupart des conservateurs alimentaires
- l'exposition à la lumière

Organisme	Conditions d'entrée en état VNC	Conditions de resuscitation
<i>Aeromonas salmonicida</i>	carence en nutriments, eau de mer à 15°C	milieu riche
<i>Campylobacter jejuni</i>	carence en nutriments, eau stérile, 4°C	injection dans souris
<i>Campylobacter jejuni</i>	carence en nutriments après la phase stationnaire, 4 à 6 semaines	oui
<i>Citrobacter freundii</i>	carence en nutriments, eau de mer stérile, 30°C	milieu nutritif
<i>Klebsiella pneumoniae</i>	carence en nutriments, tampon phosphate	oui
<i>Legionella pneumophila</i>	carence en nutriments, eau stérile, 30°C	injection en embryons de poulet
<i>Micrococcus luteus</i>	stockage en phase stationnaire, température ambiante	addition de surnageant de culture active
<i>Micrococcus luteus</i>	carence en nutriments	addition de la protéine Rpf (Resuscitation promoting factor)

Symbiose mutuelle: le biofilm

- Agrégat de micro-organismes constituant un film adhérent à une surface immergée ou soumise à un environnement liquide (eau ou autre)
- Dans leur habitat naturel, les bactéries vivent le plus souvent attachées à des supports
- Les bactéries tendent à s'associer en communauté en formant des micro-colonies et à se recouvrir de polymères organiques

Le biofilm peut être considéré comme une « population organisée de microorganismes adhérant entre eux et sur une surface, souvent englobée dans une matrice exopolymérique auto-produite et exprimant des propriétés biologiques spécifiques » (figure).

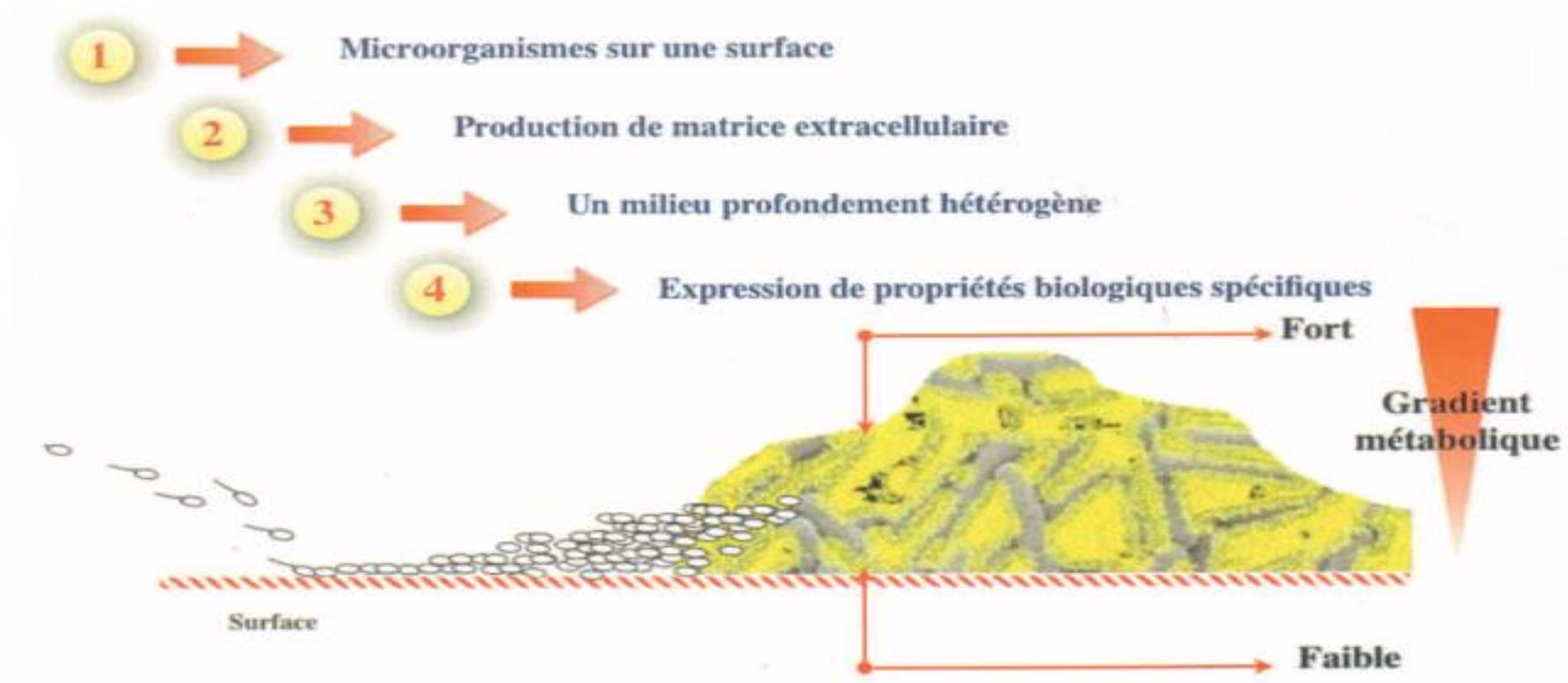


Figure 2 : Points clés de la définition du biofilm.

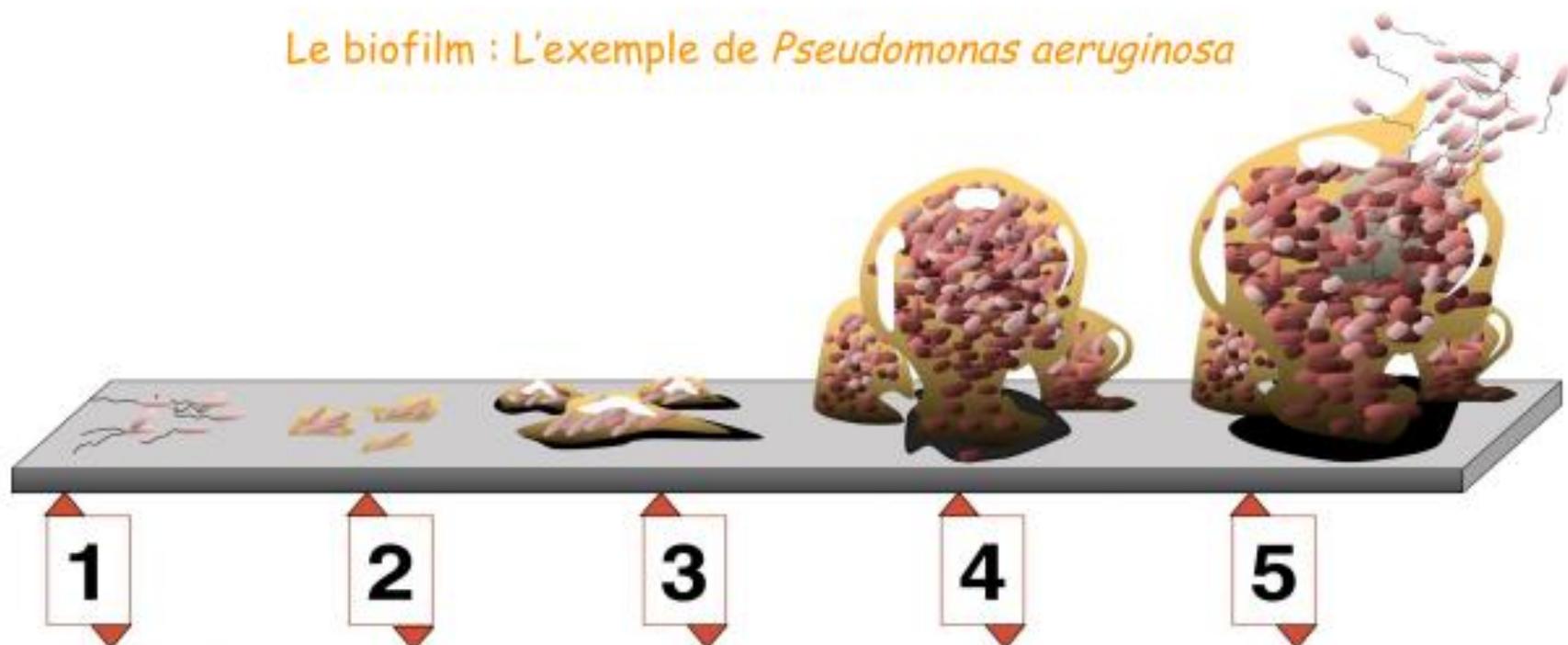
Les bactéries du biofilm possèdent des propriétés spécifiques

La notion de biofilm recouvre donc des formations biologiques assez différentes et souvent très complexes, associant haute densité bactérienne, production de matrice et croissance sur une surface.

De nombreux travaux ont montré que la formation d'un biofilm induit une expression différentielle des gènes, comparée à celle des bactéries planctoniques.

L'ensemble des caractéristiques structurales et physico-chimiques du biofilm confère aux bactéries qui le composent, des propriétés spécifiques de **morphologie, de croissance, de communication entre les cellules et de résistances aux biocides**, distinctes de celles des bactéries planctoniques.

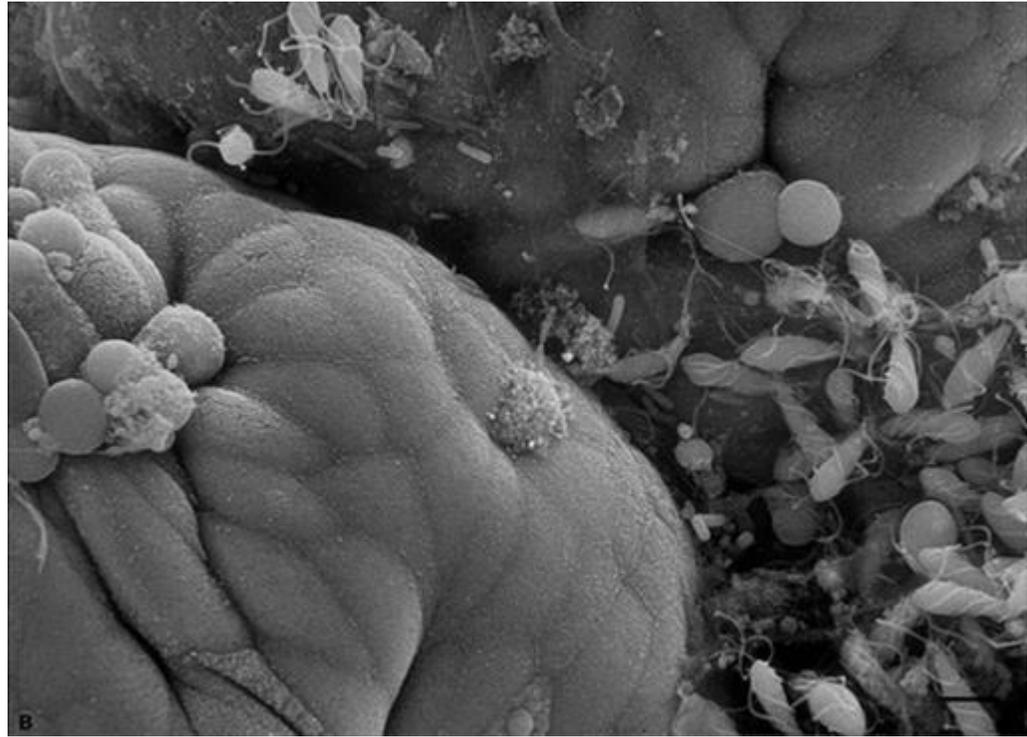
Le biofilm : L'exemple de *Pseudomonas aeruginosa*



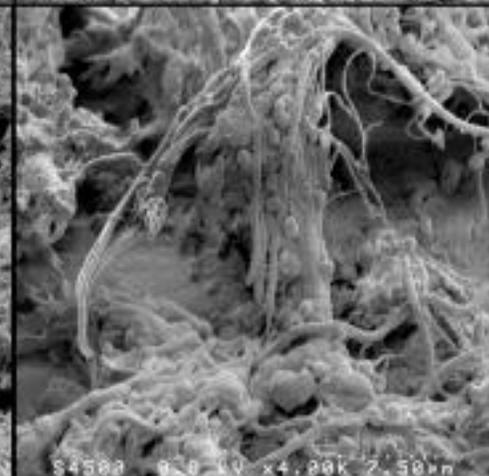
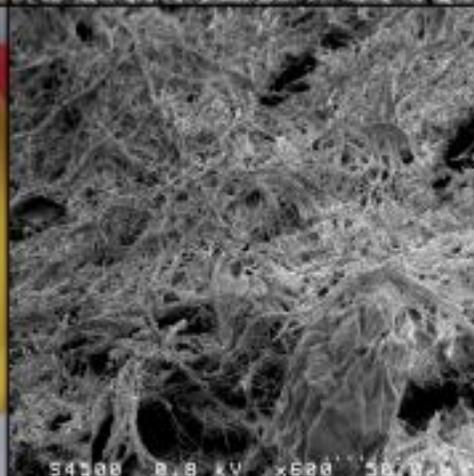
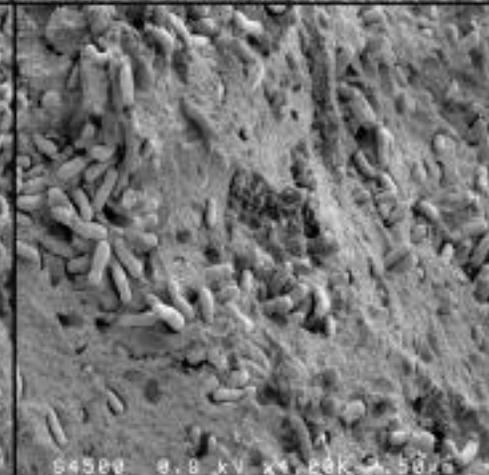
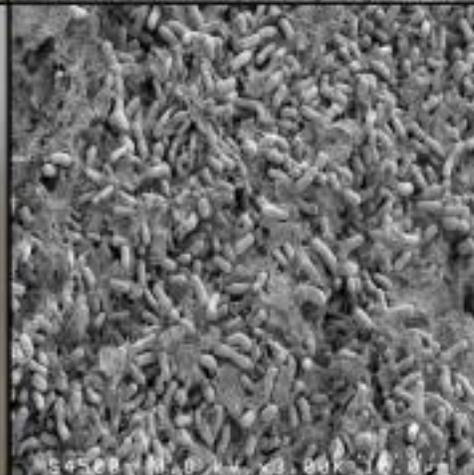
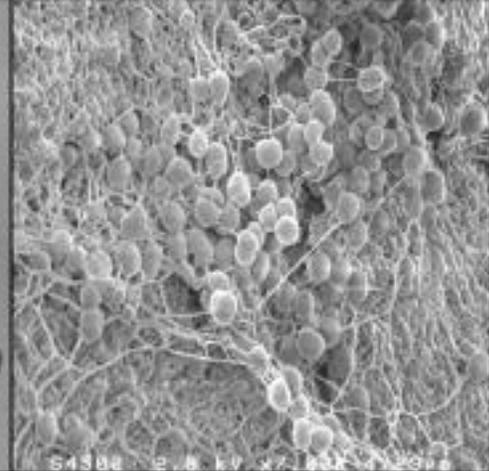
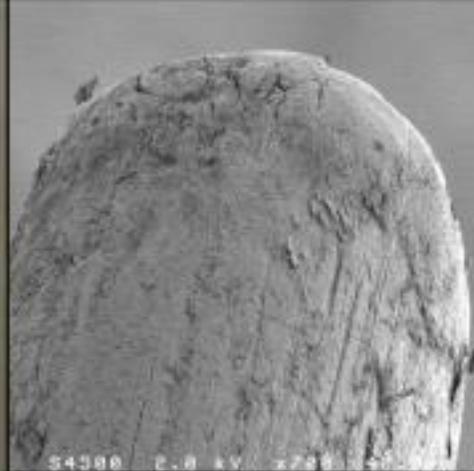
1	2	3	4	5
Attachement initial Adhérence transitoire et réversible	Attachement définitif Adhérence forte et irréversible	1^{er} stade de maturation Agrégation en microcolonies	2^{ème} stade de maturation Croissance et maturation du biofilm	Dispersion Production de molécules oxydantes ou azotantes et de bactériophages → Altération interne et de surface des microcolonies (conditions anaérobiques) Dissémination du biofilm → nouvelle colonisation
Flagelle	Pili Fimbriae Adhésines EPS	EPS Fimbriae Pili Lectines	EPS Lectines Rhamnolipides	Flagelle

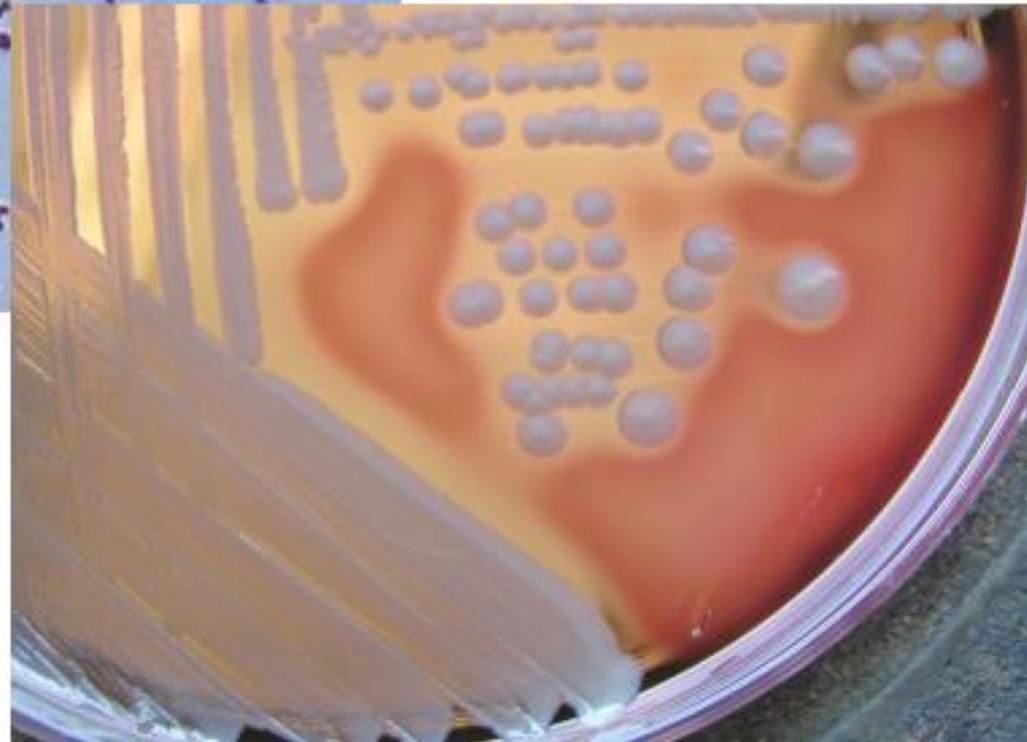
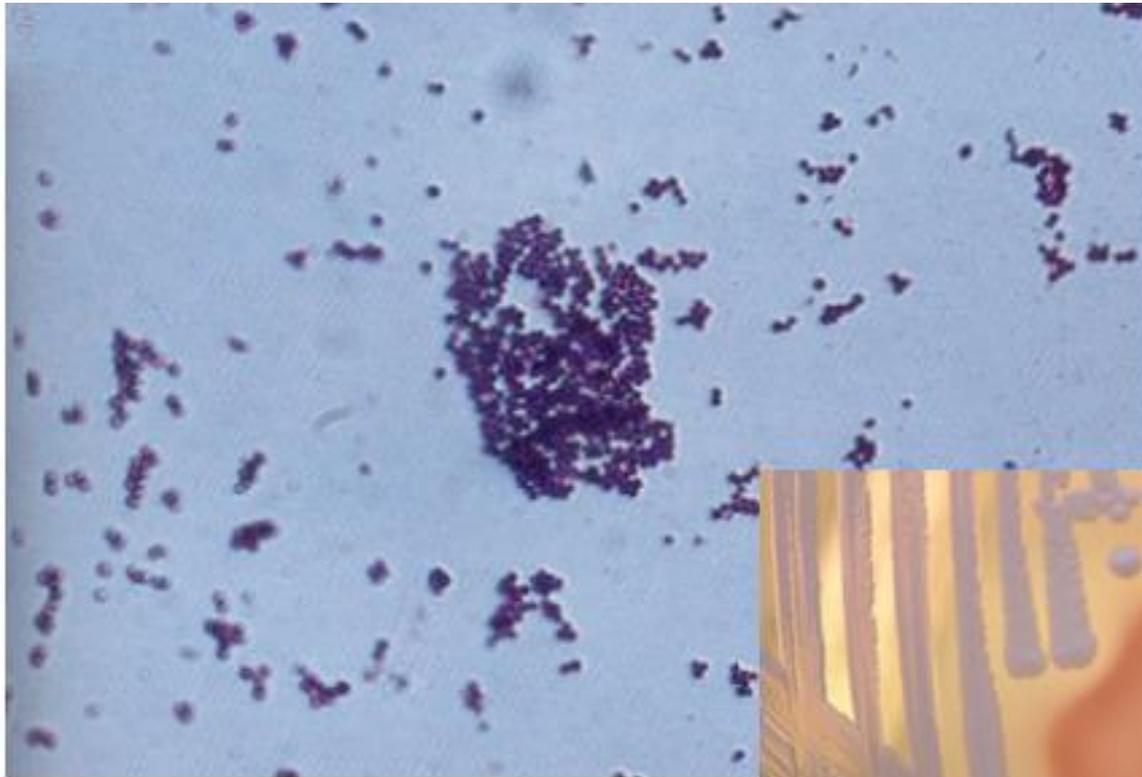


Cathéters

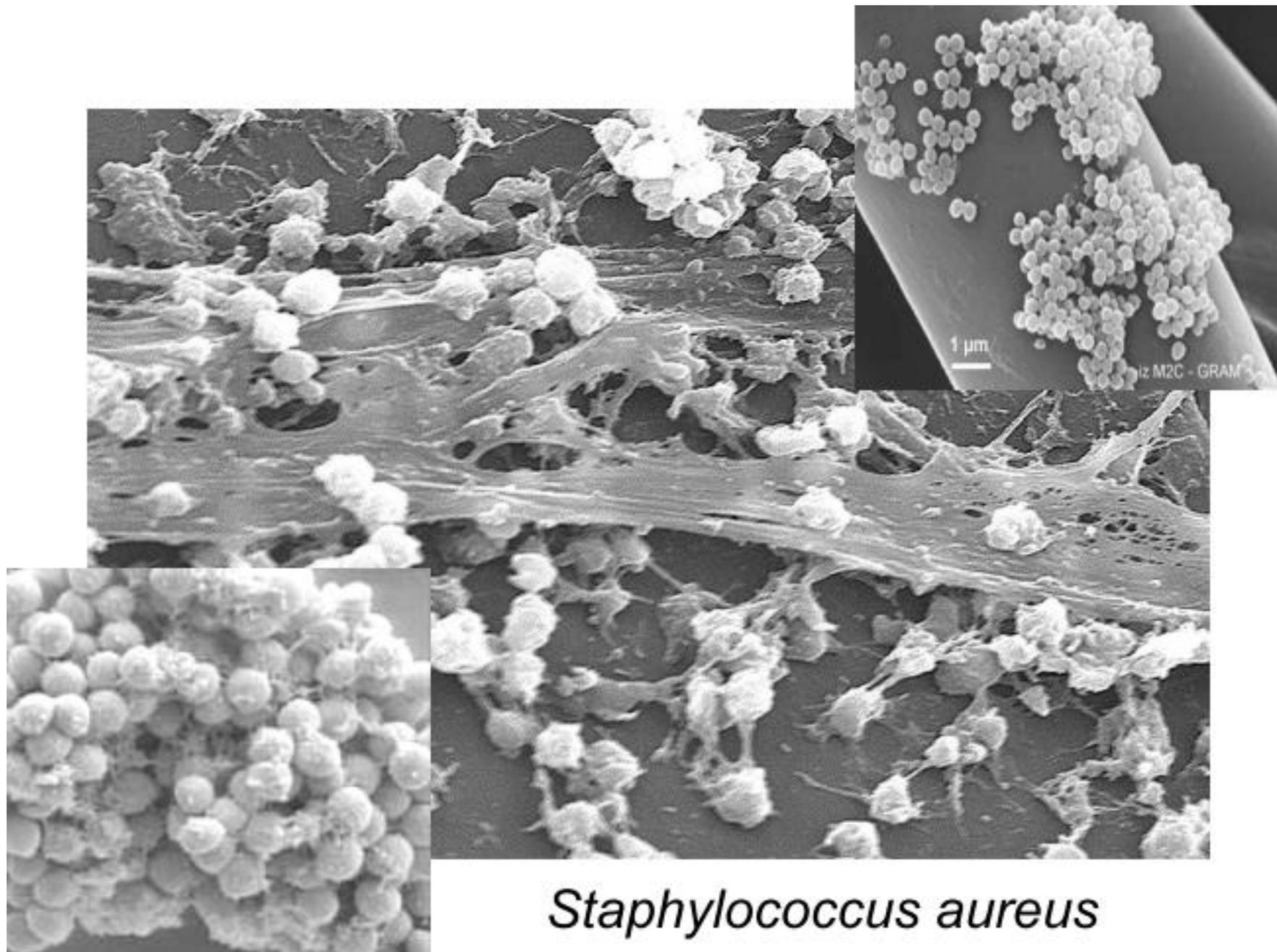


Intestin grêle





Staphylococcus aureus



Staphylococcus aureus

Biofilms et médecine

60 % des infections bactériennes impliquent des biofilms (NIH)

Infections nosocomiales

Union Européenne (European Center for Disease Prevention and Control):

3 millions/an, 50 000 décès (<http://www.ecdc.int/index.html>)

USA (Centers for Diseases Control and Prevention):

1,7 million/an, 99 000 décès (CDC Report, 2007)

60-70 % des infections nosocomiales sont liées à l'implantation d'un dispositif médical/chirurgical et aucun n'échappe à l'infection (sondes urinaires, canules d'intubation, valves cardiaques, prothèses vasculaires et orthopédiques, shunts cérébro-vasculaires, lentilles de contact, dispositifs intra-utérins, etc...) .

La physiopathologie de ces infections est liée initialement à la constitution d'un biofilm sur ces corps étrangers.

Les biofilms tuent !

