

Biodépollution

L'ensemble des procédés d'élimination de polluants, organiques ou minéraux, présents dans les milieux naturels par l'action de microorganismes.

+ quatre types de procédés:

Biodégradation: Décomposition d'un substrat organique, par action de microorganismes vivants.

Bioréduction: Réduction des composés oxydés (nitrates, oxydes métalliques) par voie biologique

Biolixiviation: Extraction des métaux contenus dans une boue, un sol, un sédiment ou un minerai par solubilisation provoquée par des microorganismes.

Biofixation/Biosorption: "Fixation" de polluants, la plupart du temps, métalliques, présents dans un effluent liquide sur des microorganismes

Les bioprocédés de dépollution sont plus intéressants que les techniques physico-chimiques:

le rapport efficacité/coût est bien supérieure

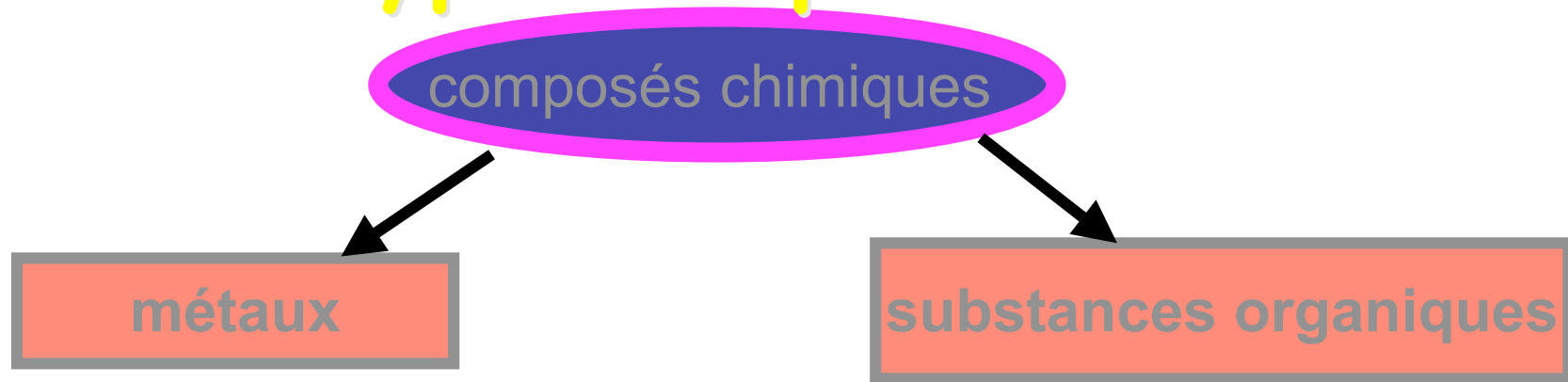
l'attaque par les bactéries permet une ÉLIMINATION complète du contaminant avec une consommation en énergie négligeable

Seul inconvénient : leur lenteur

Comment nettoye-t-on l'air, l'eau et les sols ?

Contaminants	Méthodes physico-chimiques	Utilisation de bactéries
matières organiques dans l'eau des égouts vapeurs toxiques dans l'air essence dans le sol	Précipitation avec chlorure ferrique Filtre ou colonne de rinçage Membrane d'encapsulation souterraine	<i>Streptothrix hyalina</i> <i>Pseudomonas</i> <i>Micrococcus</i>

Types de polluants



- **essentiels à la vie à très faibles doses** (oligoéléments= Na, K, Mn, Ca...), car ils sont impliqués dans le métabolisme cellulaire

- **non essentiels à la vie, métaux lourds** (Cd, Hg, Al et Pb) généralement présents à l'état de trace dans la biosphère

- **les hydrocarbures pétroliers** (gasoils, fuels, essences, kérosènes...)

- **déchets de l'exploitation du pétrole** (boues et résidus d'huiles[goudrons])

- **résidus organiques de l'industrie chimique** (alcools, acides ...)

- **composés organiques halogénés** (herbicides, fongicides, insecticides)

Biodépollution de l'eau

- origine principale de la pollution de l'eau: l'activité humaine (industries, agriculture, décharges...)
- l'épuration biologique des eaux: procédé le plus utilisé pour restaurer la qualité de l'eau (cultures bactériennes libres (boues activées) ou fixées (lits bactériens et biofilms))
- Au Canada: mise au point d'un modèle pilote de réacteur en circuit fermé pour l'épuration des eaux usées : "REDSTAR" (REacteur à Disques STérilisables Amovibles Rotatifs) (culture de souches sélectionnées)

Traitements de l'eau station d'épuration

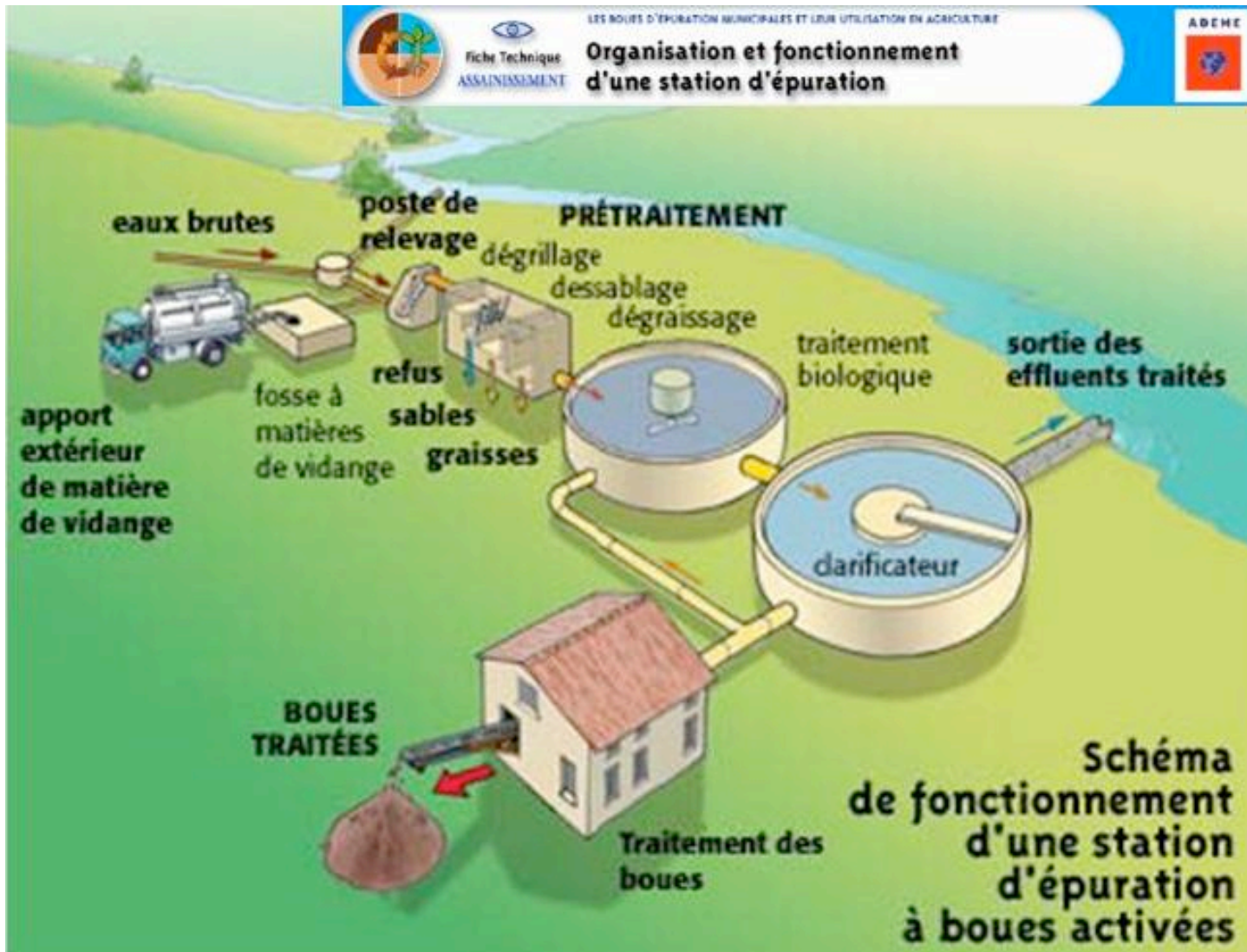
Traitements présents dans toutes les stations :

1. **un dégrillage** : passage des eaux au travers d'une grille retenant les éléments les plus grossiers qui seront éliminés avec les ordures ménagères.
2. **un dessablage, dégraissage, déshuilage** : élimination des sables qui sont déposées et des graisses qui flottent et seront raclées en surface.

Pour enlever les matières restantes, on utilise différents systèmes faisant intervenir :

des **micro-organismes** (pour les matières biodégradables),

et/ou des composés chimiques.



Les systèmes biologiques

Les boues activées (BA) : Dans cette méthode, le traitement des eaux est réalisé par des microorganismes, les bactéries qui se nourrissent de matières polluantes, mais il faut leur apporter de l'oxygène (par des apports d'air) pour leur permettre d'assimiler les polluants. Suivant ce que l'on veut traiter, on utilise différentes bactéries soit pour :

- traiter le carbone (transformer le carbone en CO_2),
- transformer l'azote en nitrates puis les nitrates en azote gaz,
- stocker le phosphore.

La séparation de l'eau traitée de la masse des bactéries (que l'on appelle « boues ») se fait dans un bassin spécifique : le "clarificateur".

Pour conserver un stock constant et suffisant de bactéries dans le bassin de boues activées, une grande partie des boues extraites du clarificateur est ensuite renvoyée dans le bassin.

La plupart des stations d'épuration municipales fonctionnent selon ce principe.



Le décantateur-digesteur : Les matières en suspension tombent par gravité, décantation. Les microorganismes se développent naturellement.

Les filtres à sable (FS) : L'eau traverse un massif de sable qui la filtre, des bactéries épuratrices se développent et complètent cette filtration.

Les filtres à roseaux : Les eaux usées sont traitées dans un bassin à deux étages de graviers planté de roseaux. Les bactéries agissent au niveau des graviers, la présence des roseaux permet d'aérer les eaux .

Les procédés biologiques à cultures fixées : les biofiltres et les lits bactériens

Le principe de ces procédés consiste à faire percoler l'eau à traiter à travers un matériau sur lequel les bactéries se développent constituant alors un biofilm sur ce support.

- lit bactérien (des galets ou des supports alvéolaires) : les eaux usées décantent sur un lit bactérien poreux L'aération est donnée par l'oxygène de l'air. Le biofilm qui se forme se détache et tombe au fur et à mesure de sa formation.

- les biofiltres (des argiles cuites, des schistes, du polystyrène, des graviers ou des sables), le développement des bactéries se fait sur des disques. Le biofilm obtenu dans ce cas reste accroché aux filtres.

Définition d'un biofilm

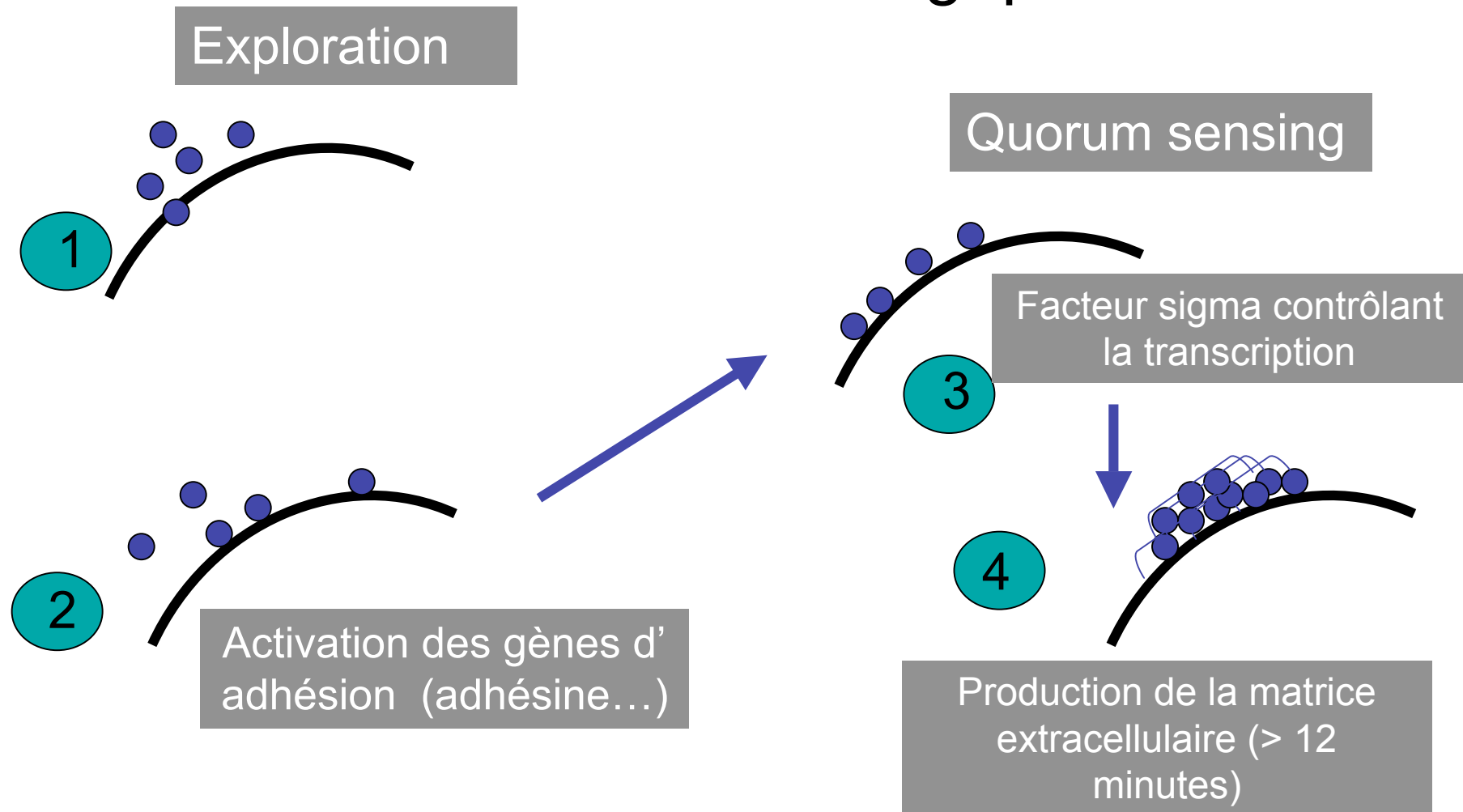
- **Un biofilm est une communauté de microorganismes (bactéries, champignons etc.) adhérant entre eux, fixée à une surface (bactéries dites sessiles) , et caractérisée par la sécrétion d'une matrice adhésive et protectrice.**
- **Ils sont naturellement résistants aux antibiotiques**
- **Ils sont à l'origine de nombreuses infections chroniques**

Les biofilms

- **Le mode de vie en biofilm est l'une des deux modalités de vie des organismes unicellulaires**
- **ce serait le mode de vie naturel de la plupart des microorganismes, notamment en milieu hostile**
- **l'autre mode de vie est la flottaison libre de type dit « planctoniques » dans un milieu liquide.**
- **La structure et la physiologie du biofilm donne aux bactéries ce que l'organisation tissulaire apporte aux cellules des êtres supérieurs.**

Développement du « phénotype » biofilm »
Il résulte d'une activation rapide de gènes (>10³ gènes)

Surfaces biologiques



Protection des bactéries dans un biofilm

1. Protection passive

- **La matrice protège physiquement les bactéries contre l'entrée des agents antimicrobiens, les détergents et les antibiotiques.**

2. Protection métabolique.

- **les bactéries entourées de biofilm sont moins actives métaboliquement, donc moins réceptives aux agents antimicrobiens**

Protection des bactéries dans un biofilm

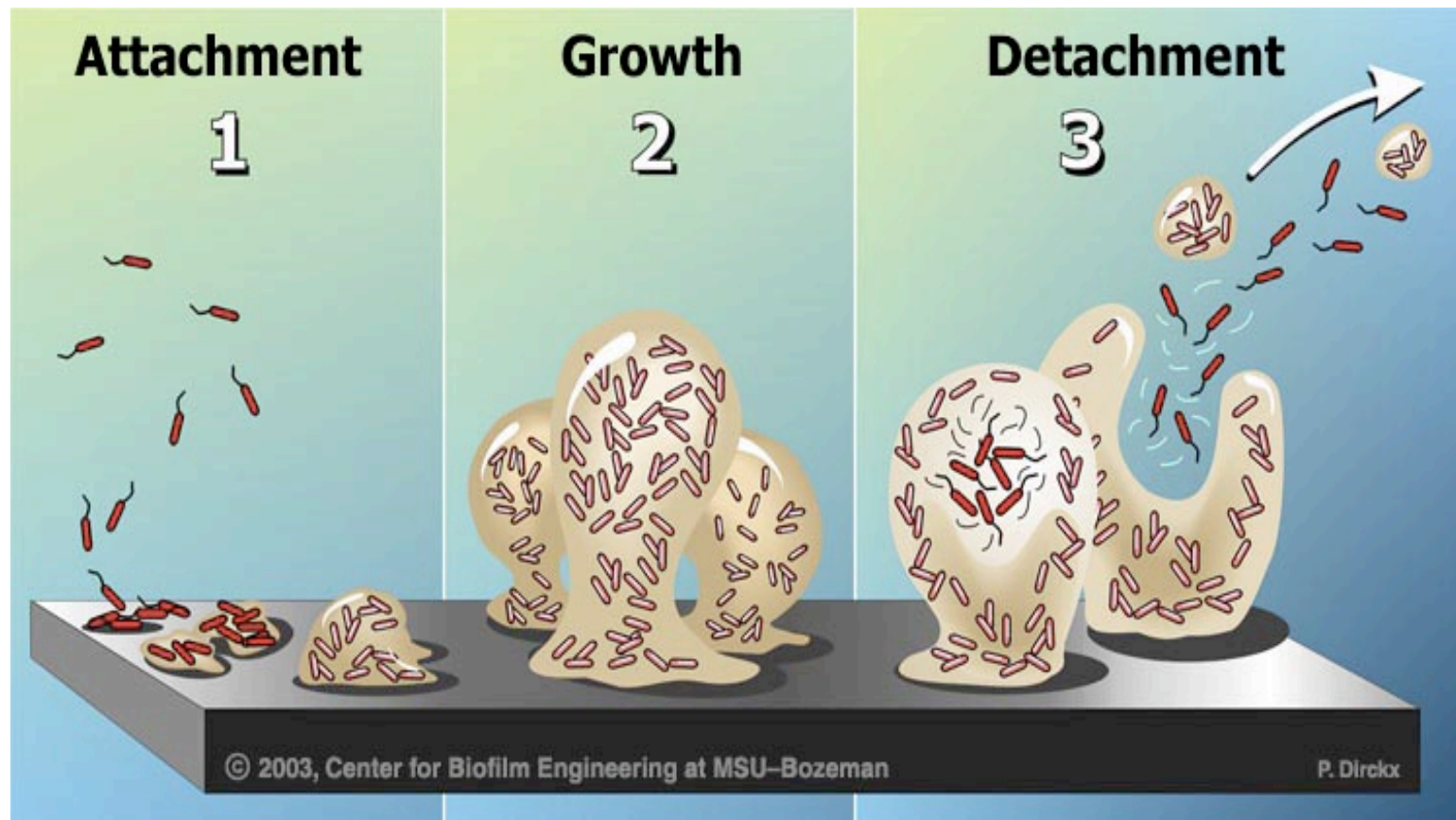
3. Protection active

- La résistance de *P. aeruginosa* aux antibiotiques a été attribuée à des pompes d'efflux du biofilm expulsant activement les composants antimicrobiens.

4. Protection génétique

- lors de leur implantation dans un biofilm l'expression génétique des bactéries peut être modifiée. L'environnement du biofilm est propice aux échanges de matériel génétique et permet le transfert de caractères de résistance.

Le cycle de vie d'un biofilm



Center for Biofilm engineering, Montana State University
www.erc.montana.edu/default.htm

pollution de l'air

- indicateurs actuels: oxydes de S, O, N, l'ozone et les particules en suspension. Les composés organiques volatils (C.O.V.), sont des molécules carbonées (hydrocarbures aliphatiques et aromatiques)
- Les C.O.V. sont responsables de nuisances olfactives et parfois sont cancérigènes. Les méthodes physico-chimiques (incinération ou oxydation thermique) d'élimination des C.O.V., présentent des limites (apport d'énergie important et dégagement de composés toxiques).
- Une voie possible pour la dégradation des C.O.V. : avoir recours à des micro-organismes capables de les utiliser comme sources d'E et/ou de C)

systemes de biodépollution de l'air (1)

La plupart des composés gazeux ne sont pas biodisponibles pour les microorganismes. Ils deviennent accessibles aux microorganismes lorsqu'ils se trouvent en solution.

biofiltres construits sur le principe d'une colonne de lavage, associée à un bioréacteur (utilisation de cultures spéciales).

Les biofiltres

Permettent d'éliminer la pollution carbonée et/ou azotée
par Nitrification - Dénitrification

✚ **Les biofiltres mettent en jeu 3 phases:**

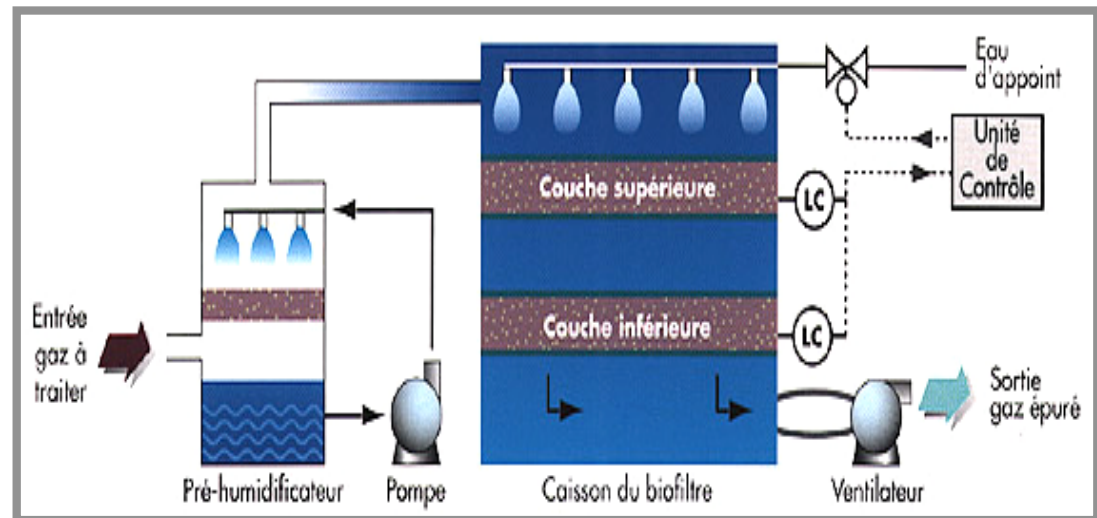
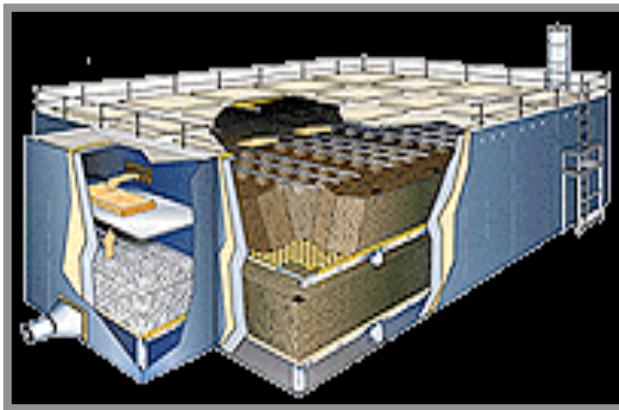
1. **Une phase solide constituée d'un matériau granulaire qui assure la rétention des matières en suspension par filtration mais aussi la fixation d'une biomasse épuratoire**
2. **Une phase liquide renouvelée par l'apport d'eau à épurer**
3. **Une phase gazeuse générée par l'insufflation de bulles d'air dans la masse filtrante**

La transformation de la matière organique et/ou l'oxydation des composés azotés contenus dans l'eau usée est effectuée par des microorganismes adhérent au support granulaire et colonisant le matériau. Le milieu doit rester en aérobiose (sauf pour la dénitrification) pour satisfaire le besoin en oxygènes des microorganismes.

systemes de biodépollution de l'air (2)

- En 1997, à Lausanne on a mis en service une unité de biofiltration pour l'épuration des émissions industrielles gazeuses contenant des solvants (brevet BioVent)
- **Technique**: Immobilisation de bactéries sélectionnées sur des biofiltres
- **Résultat**: réduction de la teneur en solvants toxiques jusqu'à 90%

Exemple de biofiltre pour effluents gazeux (modèle Bioton)



Biofiltres naturels: Les plantes !

Les plantes absorbent 44 % de l'émission atmosphérique des hydrocarbures aromatiques polycycliques émis dans l'atmosphère

Phytorémédiation

La phytoremédiation inclut toute technologie utilisant des plantes vasculaires, des algues (phycoremédiation) ou des champignons (mycoremédiation) pour éliminer ou contrôler des contaminations ou encore pour accélérer la dégradation de composés par l'activité microbienne

Principe de phytoremédiation

La phytoremédiation repose essentiellement sur les interactions plantes-sol-microorganismes.

Le sol est une matrice complexe servant de support au développement des plantes et micro-organismes qui se nourrissent des composés organiques ou inorganiques le composant.

Lorsque certains de ces composés sont en excès, le sol est qualifié de contaminé.

Le(s) composé(s) en excès peut alors être utilisé comme source d'énergie par les plantes et micro-organismes.

Dans le système plante-sol-microorganismes, la biodégradation bactérienne est souvent en amont de l'absorption racinaire.

Plantes et micro-organismes ont co-évolué pour disposer d'une stratégie à bénéfices mutuels pour gérer la phytotoxicité où les micro-organismes profitent des exsudats racinaires alors que la plante bénéficie des capacités de dégradation des microorganismes rhizosphériques pour réduire le stress de phytotoxicité

Biodépollution des sols

- le processus le plus naturel de dépollution d'un sol fait intervenir les micro-organismes telluriques: bioremédiation (utilisation des polluants comme source de C et/ou d'E)
- Le développement de nouveaux procédés biotechnologiques pour épurer les sols de toxiques vise le plus souvent à augmenter les propriétés dépolluantes de microorganismes existants: biostimulation
 1. vérifier si la flore bactérienne "autochtone", est capable d'assainir le site
 2. Prélever des échantillons sur le site contaminé et voir lesquels des microorganismes présents, survivent à une forte concentration du toxique
 3. améliorer de façon ciblée les conditions de l'environnement sur place (par l'apport de nutriments par ex.)

Biodépollution des sols (2)

- **Bioaugmentation**: apport artificiel de souches bactériennes sélectionnées et cultivées en laboratoire
- La réussite d'une bioremédiation dépend de la forme sous laquelle se présente la substance à éliminer (**biodisponibilité**) :
 - substances hydrosolubles (comme les pesticides) se retrouvent dans la nappe phréatique (donc traitement de l'eau)
 - toxique "reste accroché" dans la structure complexe du sol (donc problème)

Un exemple en France

dégradation des hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP)

- *- Les bactéries classiques sont efficaces pour la dégradation des molécules composées de 1 à 3 noyaux benzéniques (solubilité)
- * découverte de souches de champignons (pourriture blanche) qui dégradent les HAP à plusieurs noyaux . Ces organismes ont la particularité d'attaquer les polluants par des enzymes extracellulaires
- * procédé permettant de produire industriellement des champignons filamenteux capables de dégrader ces HAP complexes par inactivation d'une enzyme (la catéchol dioxygénase) qui bloque l'ouverture du noyau benzénique et empêche ainsi la biodégradation.

Un exemple au Canada



Pile de sol contaminé



Tuyau d'aération

Cas des métaux lourds

Filtres souillés par les cendres sont traités par biolixiviation (immersion dans des solutions contenant des **thiobactéries**, des champignons - *Aspergillus niger*-):

- cendres peuvent servir de charges pour matériaux de construction
- métaux extraits réutilisés.

Plantes Métallophages

- A l'échelle mondiale, on a décrit plus de 400 espèces de plantes "métallophages", capables d'absorber 0.1 à 1% de métal dans leurs bourgeons (moutarde dite de Bombay, le tabac et certaines variétés de saules).
- Après la récolte, les plantes gorgées de métaux lourds doivent être incinérées.

Biolixiviation

Colmer et Hinkle 1947

identification du rôle des microorganismes dans la biolixiviation
isolent dans des eaux de drainage acide de mines *A. ferrooxidans*....

Etude de la pollution à l'acide sulfurique de la rivière Ohio

dû à l'oxydation de la pyrite (FeS_2) contenu dans le charbon bitumeux

mais les taux d'oxydation trouvés étaient supérieurs à ceux attendus par une oxydation chimique,
des bactéries oxydant le soufre furent identifiés



Une fois l'implication de bactéries dans la réduction de sulfure métallique démontrée

le développement de la biolixiviation commençait

Biolixiviation

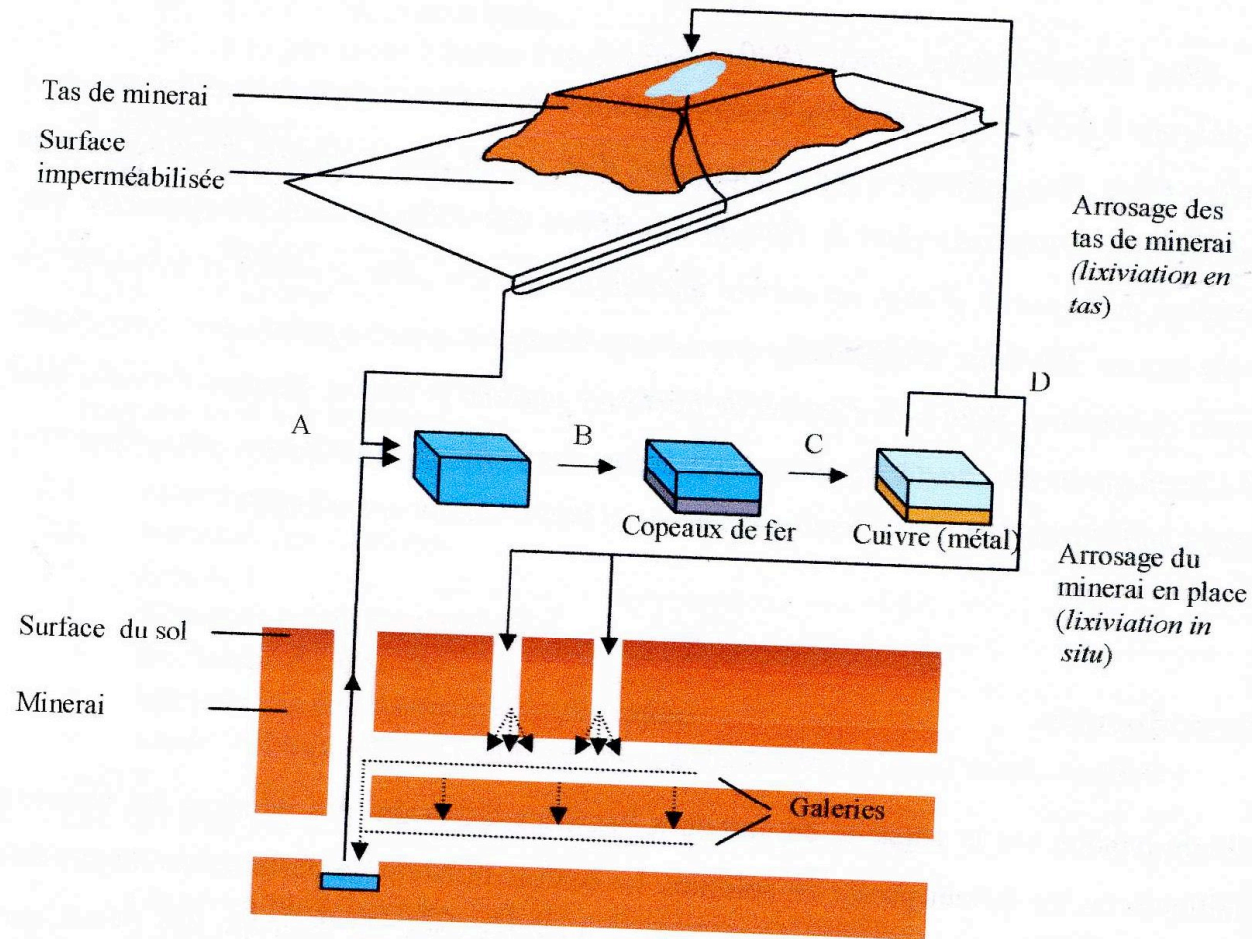
Capacité de certaines bactéries d'extraire des minerais les éléments métalliques en les faisant passer en solution.

Pays	2003 (10³ tonnes)
Australie	870
Canada	580
Chili	4,860
Chine	565
Indonésie	1,170
Kazakhstan	480
Mexique	330
Pérou	850
Pologne	500
Russie	700
USA	1,120
Zambie	300
Autres	1,500
Monde	13,900

Dans les pays en voies de développement augmentation constante de la part produite par lixiviation.

→ dont 25% produit par lixiviation

Tableau 1 : Production mondiale de cuivre en milliers de tonnes. ^a (^a USGS mineral Yearbook at <http://minerals.usgs.gov/minerals/pub/commodity/myb>, les pays en voie de développement sont surlignés en gris et leur production représente environ 50 % de la production mondiale de cuivre).

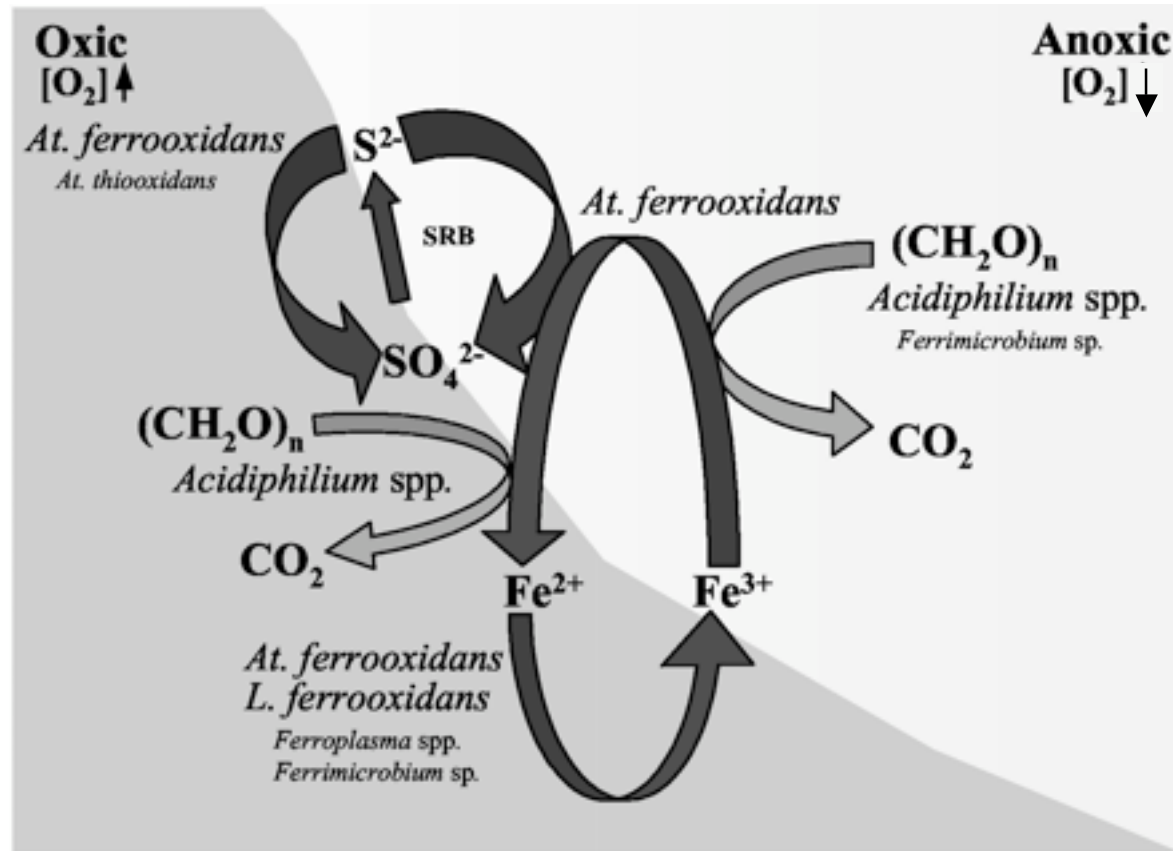


Deux types de lixiviation bactériennes pour l'extraction du cuivre: minerai en tas ou en place arrosé par une solution de lixiviation acidifiée, oxygénée ou enrichie en nutriments pour favoriser l'action des microorganismes. Les solutions de lixiviation contenant du sulfate de cuivre sont recueillies dans des bacs (A) puis amenées sur des copeaux de fer (B), le cuivre est alors séparé par traitement électrique (C). Les solutions de lixiviation sont recyclées (D).

Biolixiviation

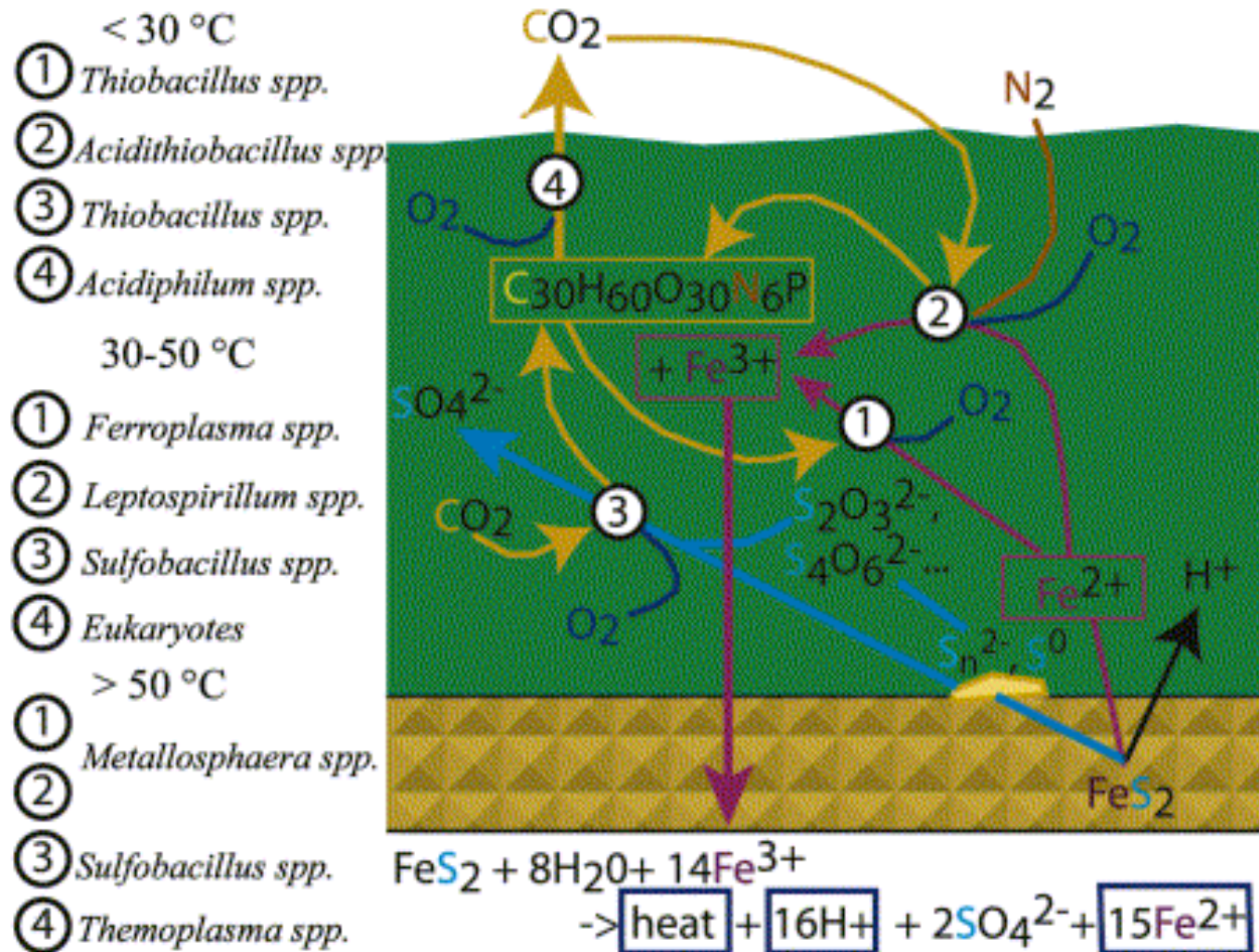
Biodiversité et écologie microbienne

Modèle 1: basé sur la disponibilité en O_2



Modèle géomicrobiologique (rivière Rio Tinto Espagne): rôle(s) des différents microorganismes identifiés dans les cycles du fer et du soufre. BSR: Bactéries Sulfato-Réductrices. Noms des bactéries: taille de la police proportionnelle à la densité cellulaire respective . (Gonzalez-Toril *et al* 2003)

Modèle 2: basé sur la température de croissance de tous les microorganismes recensés des les eaux acide de mines



Cycle du fer, du soufre et du carbone basés sur les propriétés métaboliques des microorganismes se développant dans les eaux de drainages acides des mines

Apports de la génétique moléculaire à cette problématique et au développement de ces modèles

l'étude de l'expression des gènes pourrait:

- indiquer la contribution de chaque espèce au niveau moléculaire
- décrire et quantifier les flux de matière ou d'énergie
- identifier les stratégies de symbiose ou de compétition entre les microorganismes

Conclusion

- L'importance des problèmes d'environnement
- La biodépollution prend de plus en plus de place face aux techniques chimiques
- La biodépollution exploite à la fois la diversité génétique et la versatilité métabolique des micro-organismes pour transformer les polluants en sous-produits moins toxiques qui seront intégrés dans les cycles biogéochimiques
- L'étude d'une pollution débouchant sur un procédé industriel d'extraction de minerais (la biolixiviation)
- Les micro-organismes permettent l'élimination d'un nombre important de composés xénobiotiques