

# Περιβαλλοντική και Διατροφική Μικροβιολογία

*Βιολογική Απορρύπανση*

Δημήτριος Καρπούζας  
*dkarpouzas@bio.uth.gr*

# **1. Βιολογική Αποκατάσταση (Bioremediation)**

α. Βιολογική απορρύπανση ανόργανων ρύπων

β. Βιολογική απορρύπανση οργανικών ρύπων

# **2. Επεξεργασία στερεών και υγρών αγροτικών αποβλήτων**

– Κομποστοποίηση, Βιοκλίνες - Βιοφίλτρα

**Βιολογική Αποκατάσταση**  
**ή Βιολογική Εξυγίανση ή**  
**Βιολογική Απορρύπανση**

**Βιολογική Απορρύπανση:** Η χρήση της μεταβολικής ικανότητας μικροοργανισμών με στόχο την απορρύπανση και αποκατάσταση ρυττασμένων εδαφών, υδροφόρων και λοιπών οικοσυστημάτων

# Πως προέκυψε η Βιολογική Απορρύπανση?

- Ανησυχία για την δημόσια υγεία
- Προστασία και αειφορία του περιβάλλοντος
- Κόστος απορρύπανσης

Καλύπτει μόνο 10-15% της παγκόσμιας αγοράς απορρύπανσης κυρίως λόγω 1) έλλειψης τεχνολογικών υποδομών για αποτελεσματική εφαρμογή και 2) περιορισμένης γνώσης της μικροβιακής οικολογίας σε συστήματα βιολογικής απορρύπανσης

# Στρατηγικές βιολογικής απορρύπανσης

- Βιολογική ενεργοποίηση (Biostimulation)
- Βιολογικός εμπλουτισμός (Bioaugmentation)
- Προσθήκη καταβολικών ενζύμων (Cell-free extracts)
- Φυτική Απορρύπανση (Phytoremediation)

# Βιολογική ενεργοποίηση (Biostimulation)

Η ενεργοποίηση της ενδογενούς μικροβιακής κοινότητας τους εδάφους ώστε να μεγιστοποιηθεί η αποδομητική της ικανότητα

Η εφαρμογή περιλαμβάνει **προσθήκη θρεπτικών συστατικών, βελτίωση του αερισμού και διατήρηση της θερμοκρασίας και υγρασίας σε βέλτιστα επίπεδα** ώστε να δημιουργηθούν ιδανικές συνθήκες στο μικροπεριβάλλον για την αύξηση και ανάπτυξη των ενδογενών μικροοργανισμών

# Χρήσεις Βιολογικής Ενεργοποίησης

- Η συνηθέστερη στρατηγική βιολογικής απορρύπανσης
- Στηρίζεται στην παρουσία, σε ρυπασμένες περιοχές, μικροοργανισμών που έχουν την ικανότητα να αποδομούν τους ρύπους και να τους χρησιμοποιούν για αύξηση και ανάπτυξη τους
- Προτιμάται για την απορρύπανση περιοχών που **έχουν εκτεθεί σε πολλαπλές χρήσεις και συνεπώς περιέχουν μίγμα διαφόρων ρύπων**
- Σε τέτοιες περιοχές **οι ρύποι βρίσκονται συνήθως σε συγκεντρώσεις από μέτριες ως υψηλές** και δεν υπάρχει πίεση χρόνου για αποκατάσταση των ρυπασμένων υλικών



# Βιολογικός Εμπλουτισμός (Bioaugmentation)

Εμβολιασμός ρυττασμένων υποστρωμάτων με ικανό πληθυσμό μικροοργανισμών που παρουσιάζουν αυξημένη καταβολική ικανότητα με στόχο την επιτάχυνση της αποδόμησης των ρύπων

Η προσθήκη καταβολικών μικροοργανισμών χρησιμοποιείται είτε **ως επικουρική μέθοδος** ώστε να βοηθήσει την αποδομητική δραστηριότητα της ενδογενούς μικροβιακής κοινότητας είτε **ως αυτοδύναμη μέθοδος** με την προσθήκη σημαντικού πληθυσμού μικροοργανισμών που θα πρέπει να ανταγωνισθούν με την ενδογενή μικροβιακή κοινότητα για χώρο και υποστρώματα

# Χρήσεις Βιολογικού Εμπλουτισμού

- Η συγκέντρωση των ρύπων είναι **πολύ υψηλή**
- Απαιτείται **άμεση απορρύπανση** της περιοχής
- Οι ρύποι είναι ιδιαίτερα τοξικοί
- Οι ρύποι είναι γενικά υπολειμματικά μόρια ανθεκτικά στην διάσπαση αλλά βιοδιαθέσιμα
- Διαπιστωμένη απουσία ενδογενών μικροοργανισμών που μπορούν να επιφέρουν διάσπαση των ρύπων

# Προέλευση εξωγενών μικροοργανισμών

- Ενδογενείς μικροοργανισμοί οι οποίοι έχουν απομονωθεί από το ρυπασμένο έδαφος
- Εξωγενείς μικροοργανισμοί ή κοινότητες μικροοργανισμών (consortia) που έχουν απομονωθεί από άλλο έδαφος ή περιβάλλον
- Ενδογενείς ή εξωγενείς μικροοργανισμοί που έχουν γενετικώς τροποποιηθεί για την διάσπαση των ρύπων?

# Προβλήματα Βιολογικού Εμπλουτισμού

Γενικά ο εμβολιασμός ρυττασμένων περιβαλλοντικών υποστρωμάτων με αποδομητικούς μικροοργανισμούς δεν έχει στεφτεί πάντα με επιτυχία κυρίως λόγω της ταχύτατης μείωσης του πληθυσμού του εμβολίου λόγω κυρίως ανταγωνισμού για χώρο και θρεπτικά στοιχεία με την προσαρμοσμένη ολιγότροφη ενδογενή μικροβιακή κοινότητα

# Προσθήκη Καταβολικών Ενζύμων

Τα προβλήματα εφαρμογής που παρουσιάζουν οι βιολογικές μέθοδοι απορρύπανσης όπου προστίθενται αυτούσιοι μικροοργανισμοί μπορούν να λυθούν με την εφαρμογή ενζύμων (cell-free extracts)

Ενζυμικά καταβολικά συστήματα εξειδικευμένα στην αποδόμηση οργανικών ρύπων έχουν απομονωθεί από πλήθος μικροοργανισμών και η πειραματική εφαρμογή τους για την απορρύπανση εδαφών έχει παρουσιάσει ικανοποιητικά αποτελέσματα

**Βασικό πρόβλημα** η έλλειψη μεθόδων και τεχνολογιών εφαρμογής ώστε να μεγιστοποιηθεί η επαφή των ενζύμων με το υπόστρωμα-ρύπο στο περιβάλλον

# Σημαντικοί Περιβαλλοντικοί Ρύποι

- **Οργανικοί Ρύποι**

Πολυαρωματικοί Υδρογονάνθρακες (PAHs)

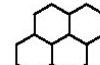
Πολυχλωριωμένα διφαινύλια (PCBs)

Πολυχλωριωμένες διβενζοδιοξίνες

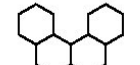
Νιτροαρωματικά (TNT)

Χλωροφαινόλες, Χλωροαλκένια

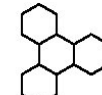
Γεωργικά Φάρμακα



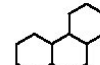
Pyrene



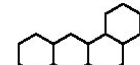
Benzo[c]phenanthrene



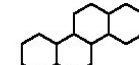
Triphenylene



Phenanthrene



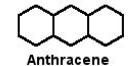
Benz[a]anthracene



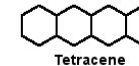
Chrysene



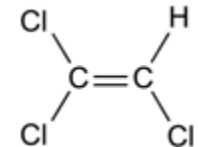
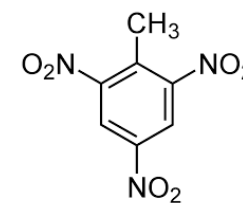
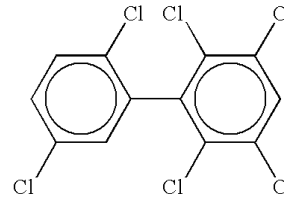
Naphthalene



Anthracene



Tetracene

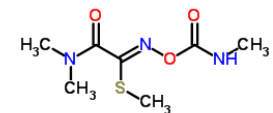
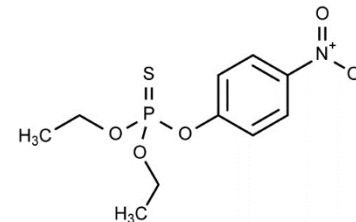


- **Ανόργανοι Ρύποι**

Μέταλλα (Cu, Cd, Pb, Ni, Zn, Cr)

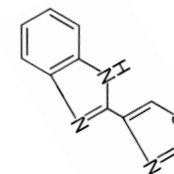
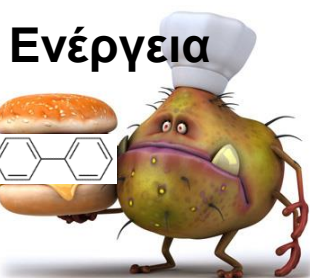
Ραδιονουκλείδια (U)

Ανιόντα (NO<sub>3</sub>, PO<sub>4</sub>)

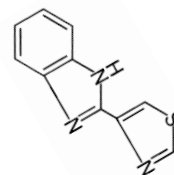
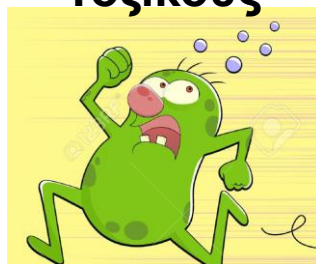


Πως 'βλέπουν' οι μικροοργανισμοί τους οργανικούς και πως τους ανόργανους ρύπους;

- **Οργανικοί Ρύποι**



Τοξικούς



- **Ανόργανοι**

# Βιολογική απορρύπανση ανόργανων ρύπων



# Ανόργανοι Περιβαλλοντικοί Ρύποι

- Μέταλλα
- Ανιόντα
- Ραδιενεργά μέταλλα

Το βασικότερο πρόβλημα που έχει να αντιμετωπίσει η βιολογική απορρύπανση είναι η ανθεκτικότητα των μετάλλων στην μικροβιακή διάσπαση με συνέπεια οι μικροοργανισμοί να έχουν αναπτύξει **άλλους μηχανισμούς** για την απομάκρυνση τους

# Βιολογική Απομάκρυνση Ανιόντων

- $\text{NO}_3$  και  $\text{PO}_4$
- Η απομάκρυνση  $\text{NO}_3$  περιλαμβάνει κυρίως την διεργασία της απονιτροποίησης
- Η απομάκρυνση των  $\text{PO}_4$  περιλαμβάνει διεργασίες συσσώρευσης φωσφορικών ιόντων σε μικροβιακά κύτταρα με την μορφή πολυφωσφορικών πολυμερών

# Απονιτροποίηση

Η διεργασία κατά την οποία  $\text{NO}_3^-$  ανάγονται υπό αναεροβικές συνθήκες προς  $\text{NO}$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{N}_2$  και ελευθερώνονται στην ατμόσφαιρα



Η απονιτροποίηση πραγματοποιείται από **ετερότροφα βακτήρια** που παράγουν ATP κατά την μεταφορά  $e^-$  μέσω της κυτοχρωμικής αλυσίδας από ένα δότη  $e^-$  σε  $\text{NO}_3^-$

# Βιολογική Απομάκρυνση Φωσφόρου

Διαδικασία που χρησιμοποιείται στην απομάκρυνση φωσφορικών από υγρά απόβλητα και περιλαμβάνει την πρόσληψη και συσσώρευση από εξειδικευμένα βακτήρια φωσφορικών με την μορφή πολυφωσφορικών κόκκων στο εσωτερικό του κυττάρου ή εξωκυτταρικών πολυμερών

# Βιολογική Απομάκρυνση Φωσφόρου

Τα βακτήρια υπό αερόβιες συνθήκες και παρουσία πηγών C συσσωρεύουν φωσφορικά υπό την μορφή πολυφωσφορικών (ως και  $10^4$  μονομερή)

Υπό αναερόβιες συνθήκες

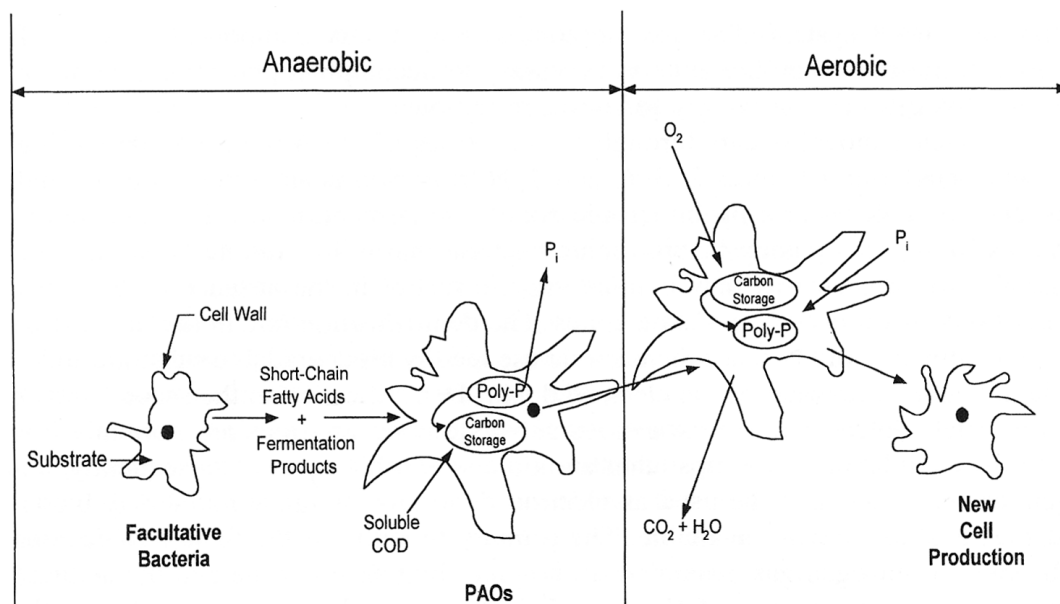
τα βακτήρια υδρολύουν τα πολυφωσφορικά για

αποθήκευση

ενέργειας

με παράλληλη ελευθέρωση

των φωσφορικών



# ***Βιολογική Απορρύπανση Μετάλλων***

# Βιολογική Απομάκρυνση Μετάλλων

- **Βιοπροσρόφηση (Biosorption) και βιοσυσσώρευση (Bioaccumulation)**
- Αναγωγή (Reduction)
- Μεθυλίωση (Methylation)
- Κατακρήμνιση (Precipitation)



# Βιοπροσρόφηση και Βιοσυσσώρευση μετάλλων

Αναφέρεται στην παθητική (βιοπροσρόφηση) ή ενεργητική (βιοσυσσώρευση) προσρόφηση ή απορρόφηση μετάλλων από τους μικροοργανισμούς

## Κύρια Χαρακτηριστικά

- Μπορεί να χρησιμοποιηθεί νεκρή (AlgaSORB®) ή ζωντανή μικροβιακή μάζα
- Τεράστιες διαφορές στην ικανότητα απορρόφησης μετάλλων από τους διάφορους μικροοργανισμούς (εξειδίκευση?)

Microorganism	Element	Uptake (% of dry weight)
<i>Zoogloea</i> sp.	Co	25
	Ni	13
<i>Citrobacter</i> sp.	Cd	170
	U	900
<i>Bacillus</i> sp.	Cu	15
	Zn	14
<i>Chlorella vulgaris</i>	Au	10
<i>Rhizopus arrhizus</i>	Pb	10
	Ag	5.4
	Hg	5.8
<i>Aspergillus niger</i>	Th	19

<sup>a</sup> From Gadd (1992).

# Βιοπρόσρρηση και Βιοσυσσώρευση μετάλλων

## Μηχανισμοί

1. Δημιουργία οργανικών συμπλόκων μεταξύ εξωκυτταρικών πολυμερών που παράγουν οι μικροοργανισμοί και μετάλλων
2. Δέσμευση των κατιόντων μετάλλων στα αρνητικά φορτισμένα συστατικά των κυτταρικών μεμβρανών όπως τειχικό οξύ (θετικά κατά Gram βακτήρια) και στα στρώματα S (θετικά κατά Gram βακτήρια και Αρχαία)

# Βιοπροσρόφηση και Βιοσυσσώρευση μετάλλων

## Εφαρμογές

Βασική απαίτηση για εμπορική εκμετάλλευση η χρήση φθηνής βιομάζας για την προσρόφηση των μετάλλων

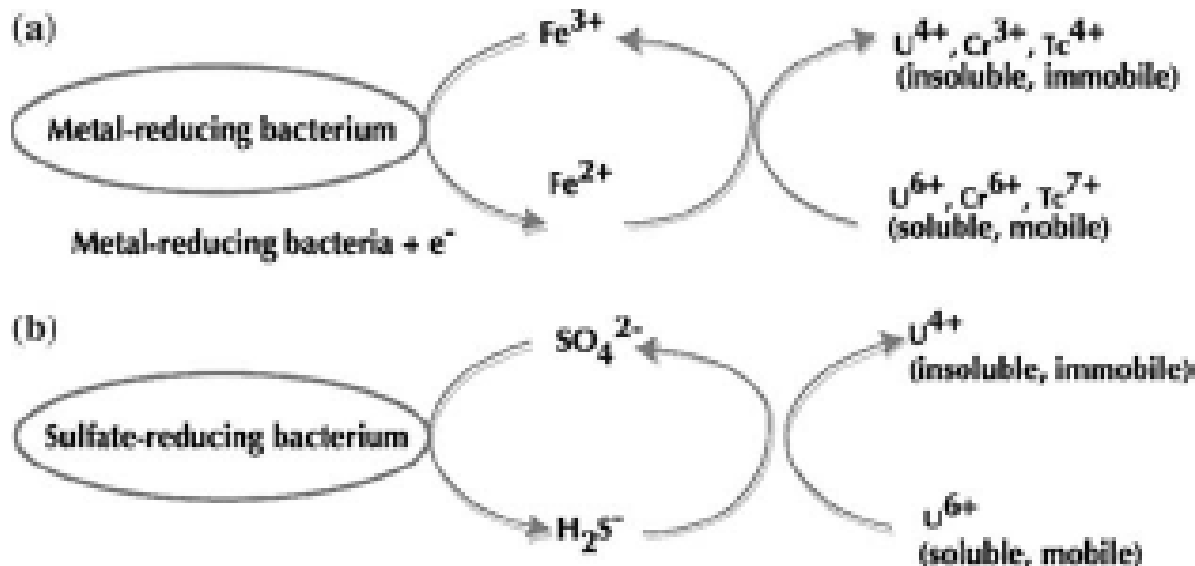
- Μικροβιακή μάζα που παράγεται σε ζυμώσεις
- Μικροβιακή μάζα από άλγη
- Μικροβιακή μάζα από συστήματα επεξεργασίας αποβλήτων

# Βιολογική Απομάκρυνση Μετάλλων

- Βιοπροσρόφηση (Biosorption) και βιοσυσσώρευση (Bioaccumulation)
- **Αναγωγή (Reduction)**
- Μεθυλίωση (Methylation)
- Κατακρήμνιση (Precipitation)

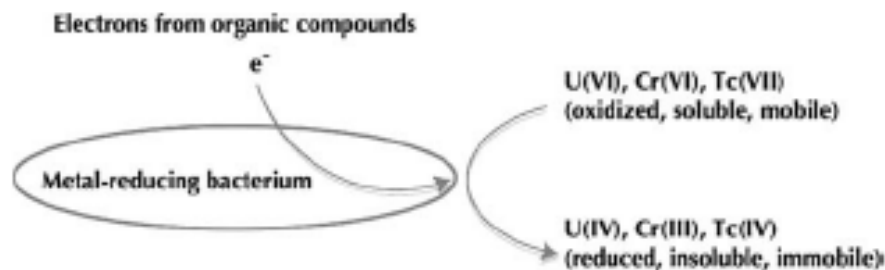
# Αναγωγή

Μικροοργανισμοί έχουν την ικανότητα να ανάγουν μέταλλα και συνήθως αυτό οδηγεί σε μορφές με χαμηλότερη διαλυτότητα και άρα περιορισμένη διαθεσιμότητα των μετάλλων για το περιβάλλον



# Αναγωγή

Οι μικροοργανισμοί αυτοί συνήθως **υπό αναερόβιες συνθήκες** και παρουσία κάποιου οργανικού μορίου ως **δότη ηλεκτρονίων και πηγή C**, χρησιμοποιεί τα μέταλλα (η οξειδωμένες τους μορφές) ως τερματικούς δέκτες ηλεκτρονίων για την παραγωγή ενέργειας (ATP)



# Πόσο καλοί θερματικοί δέκτες ηλεκτρονίων είναι τα μέταλλα?

Reaction	$\Delta G^\circ$ (kcal/mol e <sup>-</sup> )
$1/4 \text{O}_{(g)} + 1/2 \text{H}_2 \rightarrow 1/2 \text{H}_2\text{O}$	-23.55 <sup>a</sup>
$1/5 \text{NO}_3^- + 1/5 \text{H}^+ + 1/2 \text{H}_2 \rightarrow 1/10 \text{N}_{2(g)} + 1/5 \text{H}_2\text{O}$	-20.66 <sup>a</sup>
$1/2 \text{MnO}_{2(s)} + \text{H}^+ + 1/2 \text{H}_2 \rightarrow 1/2 \text{Mn}^{2+} + \text{H}_2\text{O}$	-22.48 <sup>b</sup>
$1/2 \text{UO}_2^{2+} + 1/2 \text{H}_2 \rightarrow \text{H}^+ + 1/2 \text{UO}_{2(s)}$	-18.89 <sup>c</sup>
$1/2 \text{SeO}_4^{2-} + 1/2 \text{H}^+ + 1/2 \text{H}_2 \rightarrow 1/2 \text{HSeO}_3^- + 1/2 \text{H}_2\text{O}$	-15.53 <sup>b</sup>
$1/2 \text{CrO}_4^{2-} + 5/3 \text{H}^+ + 1/2 \text{H}_2 \rightarrow 3/2 \text{Cr}^{3+} + 4/3 \text{H}_2\text{O}$	-10.76 <sup>b</sup>
$\text{Fe}(\text{OH})_{3(s)} + 2 \text{H}^+ + 1/2 \text{H}_2 \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 3 \text{H}_2\text{O}$	-10.49 <sup>b</sup>
$1/4 \text{HSeO}_3^- + 1/4 \text{H}^+ + 1/2 \text{H}_2 \rightarrow 1/4 \text{Se} + 3/4 \text{H}_2\text{O}$	-8.93 <sup>b</sup>
$1/2 \text{H}_2\text{AsO}_4^- + 1/2 \text{H}^+ + 1/2 \text{H}_2 \rightarrow 1/2 \text{H}_2\text{AsO}_3 + 1/2 \text{H}_2\text{O}$	-5.51 <sup>d</sup>
$1/4 \text{SO}_4^{2-} + 1/4 \text{H}^+ + 1/2 \text{H}_2 \rightarrow 1/4 \text{HS}^- + 1/2 \text{H}_2\text{O}$	-0.10 <sup>d</sup>



# Αναγωγή

Τέτοιοι μικροοργανισμοί είναι:

- Θειο-αναγωγικά βακτήρια (*Desulfovibrio*)
- Μέταλλο-αναγωγικά βακτήρια (*Geobacter*)

# Βιολογική Απομάκρυνση Μετάλλων

- Βιοπροσρόφηση (Biosorption) και βιοσυσσώρευση (Bioaccumulation)
- Αναγωγή (Reduction)
- **Κατακρήμνιση (Precipitation)**
- Μεθυλίωση (Methylation)

# Κατακρήμνιση

Η ικανότητα διαφόρων μικροοργανισμών να μετατρέπουν διαλυτοποιημένες μορφές μετάλλων σε αδιάλυτες μορφές όπως σουλφίδια (MS) ή σύμπλοκα με φωσφορικές ομάδες

# Κατακρήμνιση

1. Υπό αναερόβιες συνθήκες και παρουσία οργανικών υποστρωμάτων τα θείο-αναγωγικά βακτήρια μετατρέπουν διαλυτά μέταλλα ή διαλυτές μορφές μετάλλων προς αδιάλυτα μεταλλο-σουλφίδια (MS)

# Κατακρήμνιση - Εφαρμογές

- Χρήση τεχνητών υδροβιοτόπων στους οποίους διοχετεύονται υγρά απόβλητα που περιέχουν υψηλές συγκεντρώσεις διαλυτών μετάλλων (αναερόβιο ίζημα + οργανικά υποστρώματα)
- Βιοαντιδραστήρες που εμβολιάζονται με θειο-αναγωγικά βακτήρια για την αποτοξικοποίηση αποβλήτων πλούσιων σε Cd, Zn, Ni

# Βιολογική Απομάκρυνση Μετάλλων

- Βιοπροσρόφηση (Biosorption) και βιοσυσσώρευση (Bioaccumulation)
- Αναγωγή (Reduction)
- Κατακρήμνιση (Precipitation)
- **Μεθυλίωση (Methylation)**

# Μεθυλίωση

Η μεθυλίωση διαφόρων μετάλλων μπορεί να οδηγήσει σε πιο τοξικά παράγωγα (Hg) ή σε πτητικά παράγωγα με χαμηλή τοξικότητα που ελευθερώνονται στον αέρα (Se)

# *Παραδείγματα βιοαπομάκρυνσης μετάλλων από το περιβάλλον*

- Σελήνιο
- Υδράργυρος
- Αρσενικό
- Χρώμιο



# Σελήνιο - Αναγωγή

Η μετατροπή  $\text{SeO}_4^{-2}$ ,  $\text{SeO}_3^{-2}$  σε στοιχειακό  $\text{Se}^0$ , που είναι δυσδιάλυτο έχει παρατηρηθεί σε διάφορα βακτήρια

Βακτήρια χρησιμοποιούν το  $\text{SeO}_4^{-2}$  ως τερματικό δέκτη ηλεκτρονίων, αντίθετα η παραπέρα αναγωγή του  $\text{SeO}_3^{-2}$  από μικροοργανισμούς είναι μάλλον διεργασία αποτοξικοποίησης και όχι διεργασία παραγωγής ενέργειας

# Σελήνιο - Μεθυλίωση

Μικροβιακή μεθυλίωση Se προς πτητικά και λιγότερα τοξικά προϊόντα όπως **διμέθυλο σελίνιο ( $\text{CH}_3\text{SeCH}_3$ )** έχει παρατηρηθεί σε αρκετά βακτήρια και μύκητες

Το **διμεθυλοσελίνιο** σχηματίζει στο αέρα οξειδωμένα παράγωγα που δεσμεύονται σε σωματίδια και μεταφέρονται σε μεγάλες αποστάσεις

Το διμεθυλοσελίνιο είναι 700 φορές λιγότερο τοξικό από το  $\text{SeO}_4^{-2}$  και μετά από εισπνοή στον ανθρώπινο οργανισμό δεν εμφανίζει τοξικότητα σε συγκεντρώσεις ως 8000 ppm

# Υδράργυρος

- Διάφορα βακτήρια έχουν την ικανότητα να μεταβολίζουν  $\text{Hg}^{+2}$  προς  $\text{Hg}^0$  το οποίο λόγω πτητικότητας ελευθερώνεται στην ατμόσφαιρα με αποτέλεσμα την μείωση της τοξικότητας του Hg στο περιβάλλον
- **Η μεθυλίωση του Hg οδηγεί σε αύξηση της τοξικότητας**

# Αρσενικό

- Μικροβιακή μεθυλίωση As προς πτητικά και λιγότερα τοξικά προϊόντα όπως τριμέθυλο-αρσενικό έχει παρατηρηθεί σε αρκετά βακτήρια, φύκη και μύκητες
- Αναγωγή προς αδιάλυτα σουλφίδια του αρσενικού ( $\text{As}_2\text{S}_3$ ) από θείο-αναγωγικά βακτήρια (*Desulfotomaculum auripigmentum*)

# Χρώμιο

Διάφορα βακτήρια έχουν την ικανότητα να ανάγουν το  $\text{Cr}^{+6}$  σε  $\text{Cr}^{+3}$  που παρουσιάζει χαμηλότερη τοξικότητα και είναι δυσδιάλυτο

Αναερόβια βακτήρια που παρουσιάζουν ανεκτικότητα σε υψηλές συγκεντρώσεις Cr μπορούν να απομακρύνουν >99% της αρχικής ποσότητας Cr

# Βιολογική Απορρύπανση Ραδιονουκλεϊδίων

- Υψηλές ποσότητες ραδιενέργειας δεν είναι απαραίτητα τοξικές σε όλους τους μικροοργανισμούς
- Μικροοργανισμοί που απομονώθηκαν από περιοχές ρυπασμένες με ραδιενεργούς ρύπους αποτελούν τα χρησιμότερα εργαλεία για την βιολογική αποκατάσταση τέτοιων ρυπασμένων οικοσυστημάτων

- Τα δύο βασικά ραδιονουκλεΐδια που αποτελούν ποσοτικά σημαντικούς περιβαλλοντικούς ρύπους είναι τα **Ουράνιο (U)** και **Τεχνίτιο (Te)** που αποτελεί προϊόν της επεξεργασίας του U
- Ο βασικότερος μηχανισμός αποτοξικοποίησης του U από τους μικροοργανισμούς μέσω αναγωγής  $U^{+6}$  σε  $U^{+4}$

# Αναγωγή διαλυτού $U^{+6}$ προς αδιάλυτο $U^{+4}$

Πραγματοποιείται από θείο-αναγωγικά βακτήρια του γένους *Geobacter* sp., και *Anaeromixobacter* sp.

**Αντιδράσεις παρόμοιες με αυτές που περιγράφηκαν για την αναγωγή μετάλλων** από μικροοργανισμούς και οδηγούν στην μετατροπή διαλυτών μορφών ( $U^{+6}$ ) σε αδιάλυτες μορφές ( $U^{+4}$ )



# Περιβαλλοντική και Διατροφική Μικροβιολογία

*Βιολογική απομάκρυνση οργανικών ρύπων  
Μικροοργανισμοί στην βιολογική απορρύπανση  
Τεχνολογίες βιολογικής απορρύπανσης*

*Δημήτριος Καρπούζας*

# Βιολογική Απομάκρυνση Οργανικών Ρύπων

# Οργανικοί Περιβαλλοντικοί Ρύποι

- Πολυαρωματικοί Υδρογονάνθρακες (PAHs)
- Πολυχλωριωμένα Διφαινύλια (PCBs)
- Πολυχλωριωμένες Διβενζοδιοξίνες
- Νιτροαρωματικά (TNT, Νιτρογλυκερόλη)
- Γεωργικά Φάρμακα και προϊόντα μεταβολισμού
- Χλωροφαινόλες
- Χλωροαλκάνια ή χλωροαλκένια

# Μικροβιακός Μεταβολισμός Οργανικών Ρύπων

Οι μικροοργανισμοί στο περιβάλλον έχουν την ικανότητα να αποδομούν οργανικές ξενοβιοτικές ουσίες

*Όσο μεγαλύτερη είναι η διαφορά στην χημική δομή ενός συνθετικού χημικού με υπάρχοντα μόρια που παράγονται στην φύση τόσο μικρότερη είναι η πιθανότητα για σημαντική μικροβιακή διάσπαση του*

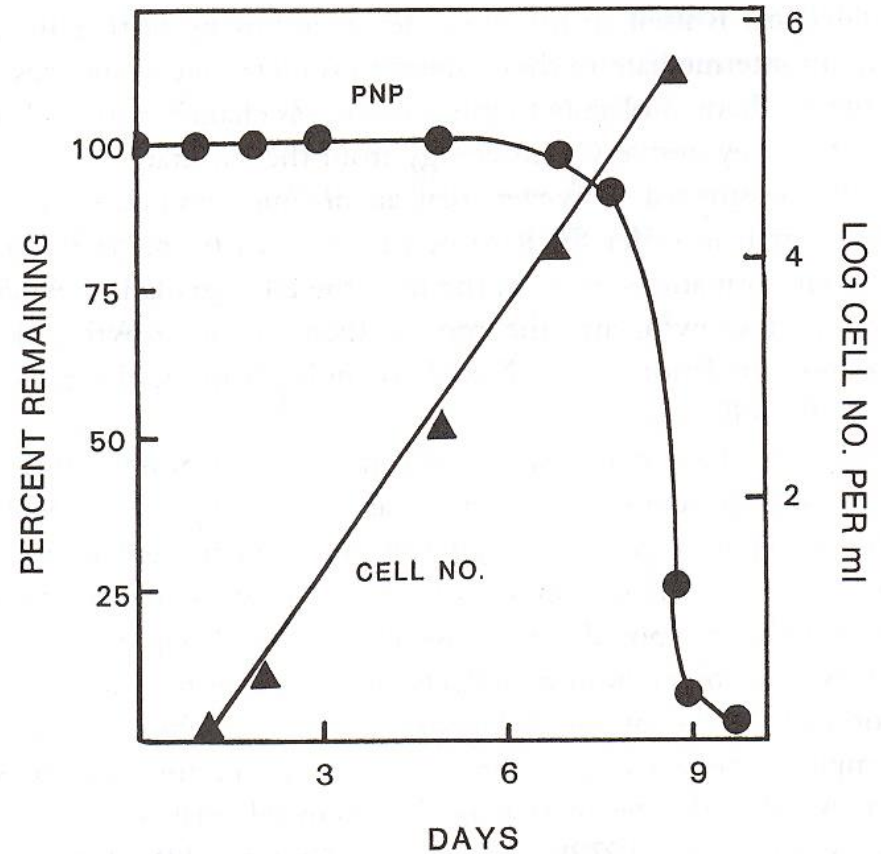
Δύο τρόποι μεταβολισμού οργανικών ρύπων στο περιβάλλον:

**1. Συμμεταβολισμός (co-metabolism)**

**2. Καταβολισμός (catabolism) ή Ανοργανοποίηση (mineralization)**

# Καταβολισμός ή Ανοργανοποίηση

Το φαινόμενο κατά το οποίο οι μικροοργανισμοί έχουν την ικανότητα να μεταβολίζουν ξενοβιοτικές ουσίες και να χρησιμοποιούν την ενέργεια που παράγεται για την αύξηση και ανάπτυξη τους

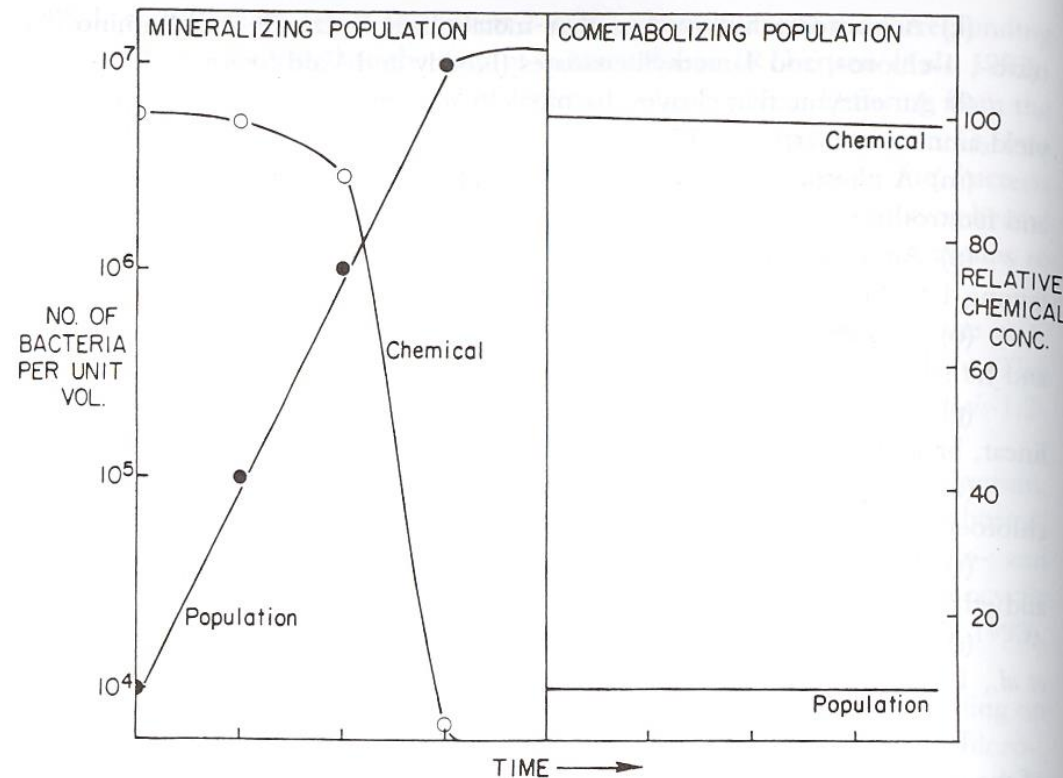


# Καταβολισμός ή Ανοργανοποίηση

- Ταχύτατος ρυθμός αποδόμησης των ξενοβιοτικών ουσιών
- Η ενέργεια που παράγεται κατά την διάρκεια του μεταβολισμού των ξενοβιοτικών ουσιών χρησιμοποιείται άμεσα από τους μικροοργανισμούς για την αύξηση και ανάπτυξη τους
- Οι μικροοργανισμοί συνεχίζουν να μεταβολίζουν τις ξενοβιοτικές ουσίες ως βασικό υπόστρωμα ακόμη και παρουσία εύκολα διαθέσιμων εναλλακτικών πηγών C ή N.
- Ο καταβολισμός οδηγεί στην παραγωγή απλούστερων μορίων που μπορούν να μεταβολισθούν παραπέρα από τους μικροοργανισμούς προς  $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$
- Οι μικροοργανισμοί κατέχουν εξειδικευμένα ενζυμικά συστήματα για την αποδόμηση των συγκεκριμένων ξενοβιοτικών ουσιών

# Συμμεταβολισμός

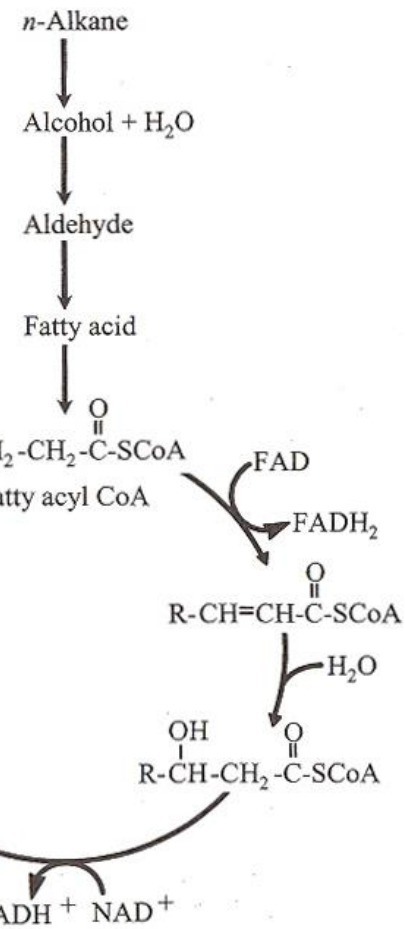
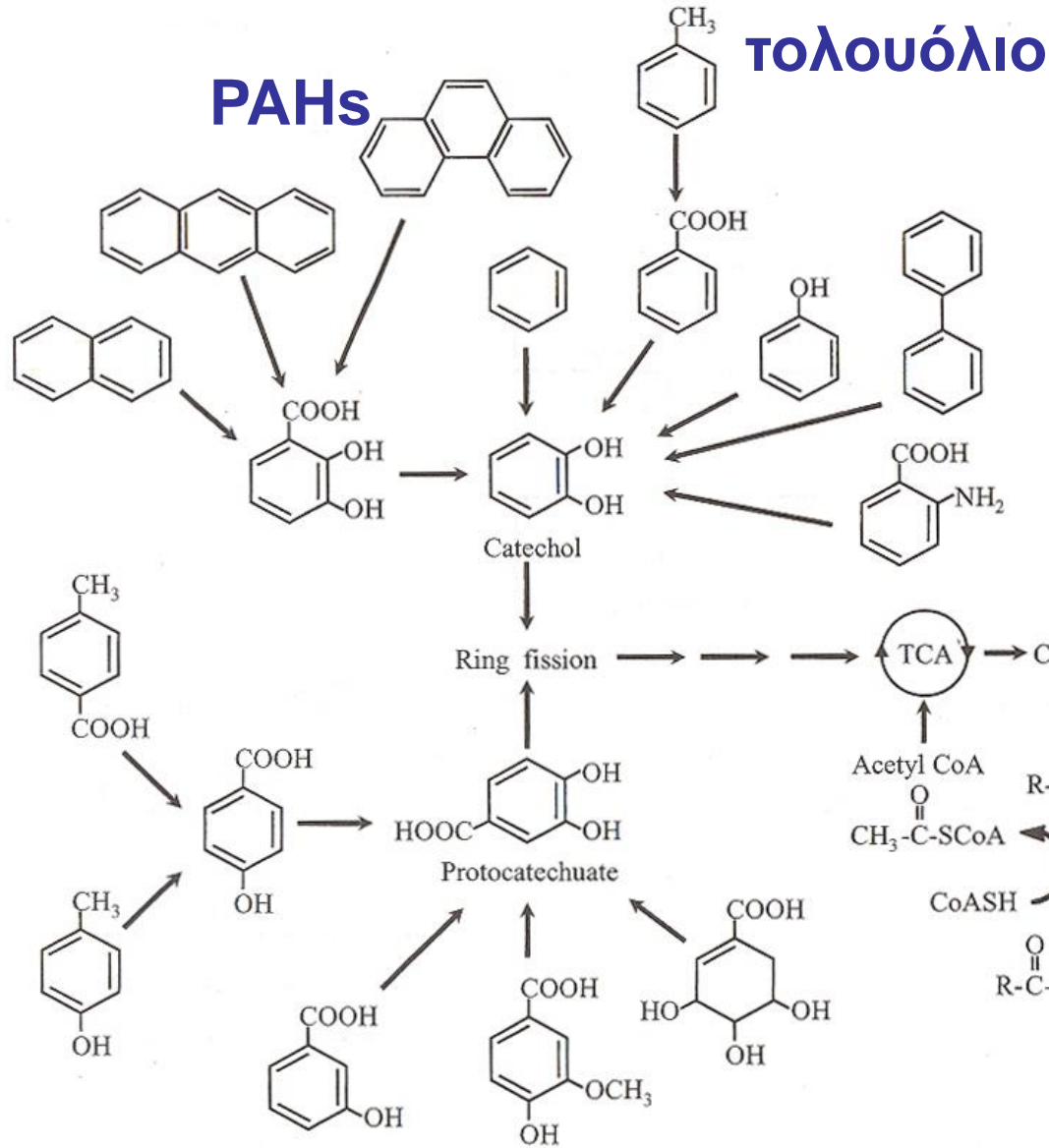
Το φαινόμενο κατά το οποίο μικροοργανισμοί έχουν ενζυμικά συστήματα ευρέως φάσματος τα οποία χρησιμοποιούνται για τον μεταβολισμό διαφόρων φυσικών υποστρωμάτων αλλά ταυτόχρονα μπορούν να μεταβολίζουν και ξενοβιοτικές ουσίες που βρίσκονται στο περιβάλλον.



# Συμμεταβολισμός

- Βραδύς μεταβολισμός με σταθερό ρυθμό αποδόμησης
- Οι μικροοργανισμοί δεν αποκομίζουν ενεργειακό όφελος από την αποδόμηση των ξενοβιοτικών ουσιών για την ανάπτυξη τους
- Παρουσία εναλλακτικών πηγών C ή N αναστέλλεται ο μεταβολισμός των ξενοβιοτικών ουσιών
- Ο συμμεταβολισμός οδηγεί στην παραγωγή προϊόντων μεταβολισμού που δεν μπορούν να μεταβολισθούν παραπέρα από τους μικροοργανισμούς
- Οι μικροοργανισμοί κατέχουν ενζυμικά συστήματα ευρέως φάσματος





Η μικροβιακή διάσπαση οργανικών ρύπων οδηγεί στην παραγωγή προϊόντων που ενσωματώνονται στον μεταβολισμό των αποδομητικών μικροοργανισμών προς παραγωγή ενέργειας

# Βιολογική Απομάκρυνση Πετρελαιοειδών

Το πετρέλαιο περιέχει μίγματα διαφόρων οργανικών ρύπων που παρουσιάζουν συνήθως ανθεκτικότητα στην μικροβιακή διάσπαση:

- **n- Αλκάνια και αλειφατικούς υδρογονάνθρακες**
- **Ετεροκυκλικά αρωματικά μόρια**
- **Μονοκυκλικά:** βενζόλιο, τολουόλιο, αιθυλβενζόλιο, ξυλένιο (BTEX)
- **Πολυκυκλικά:** φαιναθρίνη, ναφθαλένιο, ανθρακένιο (PAHs)

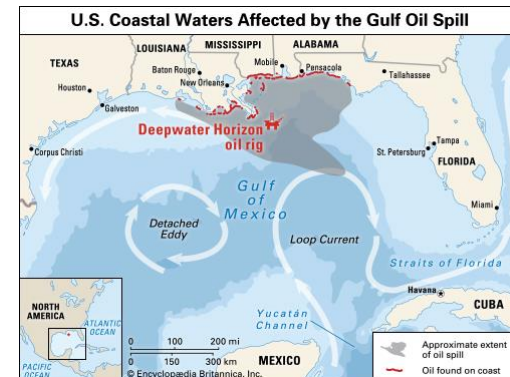
# Προέλευση Πετρελαίου στο Περιβάλλον

Η παρουσία του πετρελαίου στο περιβάλλον οφείλεται :

- Σε διαρροές δεξαμενών ή αγωγών μεταφοράς πετρελαίου στο έδαφος (90% των περιπτώσεων)
- Σε ατυχήματα που συμβαίνουν σε δεξαμενόπλοια μεταφοράς πετρελαίου (10% περιπτώσεων)
- Έχει υπολογιστεί ότι περίπου 2 εκατομμύρια τόνοι πετρελαίου καταλήγουν στην θάλασσα κάθε έτος
- Περίπου το 40% των υπόγειων αποθηκευτικών δεξαμενών πετρελαίου παρουσιάζουν διαρροές

# Βιολογική αποκατάσταση ρυπασμένων υδροφόρων συστημάτων με πετρέλαιο

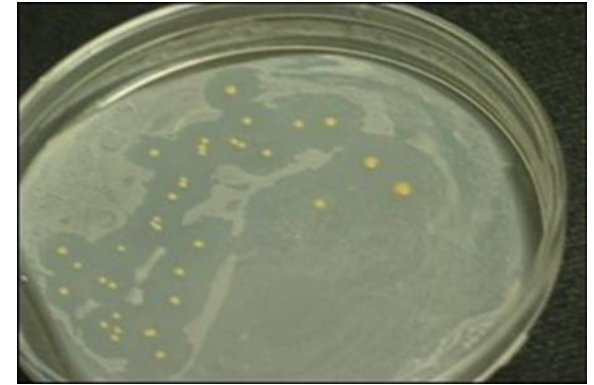
- Ναυάγια δεξαμενόπλοιων όπως το Exxon Valdez (1989)
- Διαρροή πετρελαίου από αγωγούς όπως η ρύπανση του Μεξικού Deepwater Horizon BP



# Μικροοργανισμοί και Βιολογική Απορρύπανση

# Μικροοργανισμοί στην Βιολογική Απορρύπανση

- Μύκητες
- Βακτήρια



Η επιλογή του είδους των μικροοργανισμών που θα χρησιμοποιηθούν εξαρτάται από πολλές παραμέτρους όπως είναι **το είδος του ρύπου που πρέπει να απομακρυνθεί** και **η παρουσία ή όχι και άλλων ρύπων**



# Μύκητες Λευκής Σήψης στην Βιολογική Απορρύπανση

- Ονομάζονται white rot fungi (WRF) διότι το υπόστρωμα ανάπτυξης τους είναι το ξύλο στο οποίο προκαλούν χαρακτηριστική λευκή σήψη
- Οι WRF έχουν ως βασικό υπόστρωμα ανάπτυξης τις κυτταρίνη και ημικυτταρίνη και ως δευτερογενές υπόστρωμα την λιγνίνη
- Είναι βασιδιομύκητες που καρποφορούν και δίνουνμανιτάρια

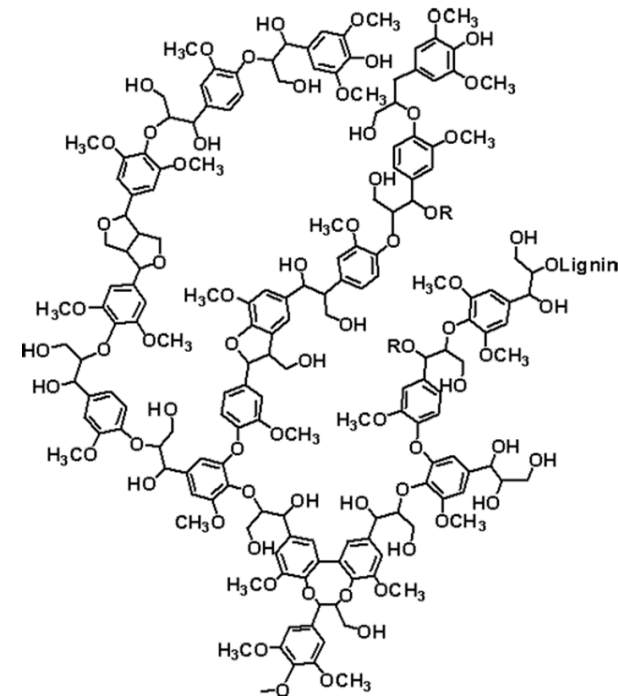


# Χαρακτηριστικά Μυκήτων Λευκής Σήψης

1) **Εξωκυτταρικά ένζυμα:** ο ρύπος δεν χρειάζεται

να εισέλθει στον μικροοργανισμό και επίσης υπάρχει δυνατότητα αποδόμησης και ρύπων που βρίσκονται προσροφημένοι και δη προστατευμένοι στα εδαφικά κολλοειδή

2) **Χαμηλής Εξειδίκευσης ένζυμα:** τα ένζυμα αυτά έχουν την ικανότητα μεταβολισμού της λιγνίνης, ενός πολύπλοκου πολυμερούς. Η ικανότητα τους αυτή να καταδεικνύει το ευρύ φάσμα δράσης των ενζύμων αυτών των μυκήτων.





# Ενζυμικά συστήματα ΜΛΣ - Υπεροξειδάσες

Οι WRF παράγουν τρεις κατηγορίες ενζύμων (υπεροξειδάσες) που οξειδώνουν την λιγνίνη παρουσία  $H_2O_2$  (εκτός από λακκάσες)

- **Εξαρτώμενες της Λιγνίνης υπεροξειδάσες (LiP):** Οξειδώνουν μη φαινολικά τμήματα της λιγνίνης αφαιρώντας ένα ηλεκτρόνιο και σχηματίζοντας κατιονικές ρίζες που διασπώνται χημικά
- **Εξαρτώμενες του Mn Υπεροξειδάσες (MnP):** Οξειδώνουν  $Mn^{+2}$  σε  $Mn^{+3}$  το οποίο οξειδώνει φαινολικά τμήματα της λιγνίνης προς φαινοξικές ρίζες με αποτέλεσμα την διάσπαση των ουσιών
- **Λακκάσες (Lac):** Είναι Cu-οξειδάσες που χρησιμοποιούν μοριακό  $O_2$  για την οξείδωση κυρίως φαινολικών ενώσεων προς φαινοξικές ρίζες

# Προβλήματα εφαρμογής μυκήτων λευκής σήψης στην βιολογική απορρύπανση

1. Περιορισμένη γνώση της φυσιολογίας και λειτουργίας των λιγνολυτικών ενζυμικών συστημάτων των μυκήτων
2. Αργή δράση και χαμηλή ικανότητα ανταγωνισμού με την ενδογενή μικροβιακή κοινότητα



# Βακτήρια στην Βιολογική Απορρύπανση

- Σημαντικός αριθμός βακτηρίων έχουν απομονωθεί από ρυπασμένα εδάφη που έχουν την ικανότητα να αποδομούν γεωργικά φάρμακα, πετρέλαια, PCP, PCBs.
- Η χρήση βακτηρίων στην βιολογική απορρύπανση αποτελεί σημαντική μέθοδο ιδιαίτερα μέσω της βιολογικής ενεργοποίησης
- Η προσθήκη βακτηρίων στο έδαφος για την βιολογική απορρύπανση εδαφών έχει δοκιμασθεί σε πλήθος περιπτώσεων με αντικρουόμενα αποτελέσματα

# Προβλήματα εφαρμογής βακτηρίων στην Βιολογική Απορρύπανση

Τα καταβολικά ένζυμα των βακτηρίων είναι συνήθως εξειδικευμένα για το μεταβολισμό περιορισμένου αριθμού οργανικών ρύπων και συνεπώς η χρήση τους περιορίζεται μόνο σε περιπτώσεις που το έδαφος περιέχει ένα μόνο σημαντικό ρύπο