

Chapitre 5: Biotechnologie microbienne de l'environnement

Le potentiel biogéochimique de l'ensemble des microorganismes est énorme. En fait, les microorganismes sont les plus grands chimistes de la Terre. C'est pourquoi ils ont été employés pour aider à l'extraction de métaux précieux de minérais à faible teneur (biolixivation microbienne) et à dépolluer l'environnement. Le terme **bioremédiation** s'applique au nettoyage du pétrole, produits chimiques toxiques et autres polluants par les microorganismes. La bioremédiation est une méthode de nettoyage des polluants couteuse et effective, et dans certains cas la seule façon pratique de dépolluer.

Biolixivation des minérais

La production d'acide et la mise en solution des minéraux par les bactéries acidophiles peuvent être bénéfiques dans l'exploitation minière de certains métaux. Les sulfures se combinent avec de nombreux métaux pour former des minéraux très insolubles, et de nombreux minérais utilisés comme source de ces métaux sont des sulfures.

Si la concentration en métal du minéral est faible, il ne peut pas être économiquement rentable de concentrer le minéral par de procédés chimiques conventionnels. Dans ce cas la lixiviation microbienne est mise en œuvre. La lixiviation est surtout employée dans le cas des minérais de cuivre, car le sulfate de cuivre, formé pendant l'oxydation des minéraux de sulfures de cuivre, est très solubles dans l'eau. Ainsi, environ un quart de tout le cuivre extrait dans le monde est obtenu par lixiviation.

Les sulfures s'oxydent spontanément dans l'air. C'est aussi le cas de la plupart des sulfures métalliques, mais l'oxydation est beaucoup plus lente que dans le cas de H_2S et HS^- . Cependant, *Acidithiobacillus ferrooxidans* et d'autres procaryotes métallo-oxydants peuvent catalyser l'oxydation des sulfures minéraux à un taux plus élevé, contribuant ainsi à la mise en solution du métal.

Les taux relatifs d'oxydation des minéraux de cuivre en présence ou en absence de bactéries sont illustrés dans la figure suivante. Les minéraux sont différemment sensibles à l'oxydation, et ceux qui sont le plus facilement oxydés sont les plus adaptés à la lixiviation microbienne. C'est ainsi que les minéraux de sulfures de fer et de cuivre, tels que la pyrohérite (FeS) et la covellite (CuS), sont facilement lessivés, tandis que les minéraux de plomb et de molybdène le sont beaucoup moins.

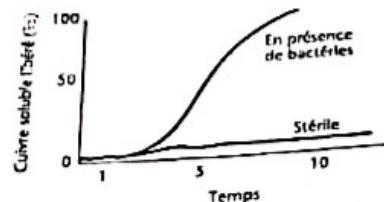


FIGURE 19.36 Effets de la bactérie *Acidithiobacillus ferrooxidans* sur la lixiviation du cuivre à partir de la covellite (CuS). La lixiviation a eu lieu dans une colonne de laboratoire et la solution acide contenait les composés inorganiques nécessaires à la croissance de la bactérie. L'activité de lixiviation a été mesurée en analysant le cuivre soluble présent dans la solution acide s'écoulant à la base de la colonne. Cette solution circule en permanence dans un circuit fermé.

Figure : Effet de la bactérie *Acidithiobacillus ferrooxidans* sur la lixiviation du cuivre ; partir de la covellite (CuS)

Processus de lixiviation

Dans le processus de lixiviation, les minéraux à faible teneur ou les débris rocheux sont déversés pour former un terril et une solution diluée d'acide sulfurique percole le terril de haut en bas. Le liquide qui s'écoule à la base du terril, riche en métaux, est collecté et transporté dans une installation de précipitation, où le métal recherché est précipité et purifié. Le liquide percolé est alors pompé vers le sommet du terril et le cycle se répète. Si nécessaire, de l'acide est ajouté pour maintenir le pH faible.

Les bactéries peuvent catalyser l'oxydation des minéraux sulfurés de différentes façons. La covellite (CuS), minéral dans lequel le cuivre a une valence de +2, servira d'exemple pour illustrer les procédés. *Acidithiobacillus ferrooxidans* peut oxyder le sulfure CuS en SO_4^{2-} , une réaction qui peut aussi se produire spontanément.

Cependant, la réaction la plus importante dans la lixiviation du cuivre implique l'oxydation chimique du minéral de cuivre par les ions ferriques formés lors de l'oxydation bactérienne des ions ferreux. Dans la plupart des minéraux, la pyrite (FeS_2) est présente, et son oxydation conduit la formation du fer ferrique. Le fer ferrique est un excellent accepteur d'électrons pour les minéraux contenant des sulfures, et la réaction spontanée de CuS avec le fer ferrique se traduit par la mise en solution du cuivre et la formation de fer ferreux. Ce phénomène peut aussi se produire au cœur du terril, en condition anaérobies.

La récupération du métal

Le cuivre soluble est récupéré du liquide de lixiviation dans l'installation de précipitation. Des copeaux de fer (Fe^0) sont ajoutés pour récupérer le cuivre du liquide de lixiviation selon la réaction indiquée (figure 2), ce qui conduit à la formation de Fe^{2+} . Le liquide riche en Fe^{2+} est alors transféré dans un bassin d'oxydation où *Acidithiobacillus ferrooxidans* se développe et l'oxyde en Fe^{3+} .

De l'acide est ajouté dans le bassin pour maintenir le pH faible ce qui maintient Fe^{3+} en solution et ce liquide riche en fer ferrique est alors pompé vers le sommet du terril, et le Fe^{3+} contribue à oxyder davantage de sulfure du minéral. Ainsi, l'ensemble du processus de lixiviation est entretenu par l'oxydation de Fe^{2+} en Fe^{3+} par les bactéries.

Les températures élevées peuvent être un problème pour les opérations de lixiviation. *Acidithiobacillus ferrooxidans* est mésophile, mais la température au cœur d'un terril peut augmenter spontanément suite à la chaleur résultant de l'activité microbienne. Dans ce cas, des chimiolithotrophes ferro-oxydants thermophiles, comme des espèces de *Thiobacillus*, *Leptospirillum ferrooxidans* et *sulfobacillus*, et à des températures encore plus élevées, (60-80°C), *sulfolobus*, interviennent dans le processus de lixiviation.

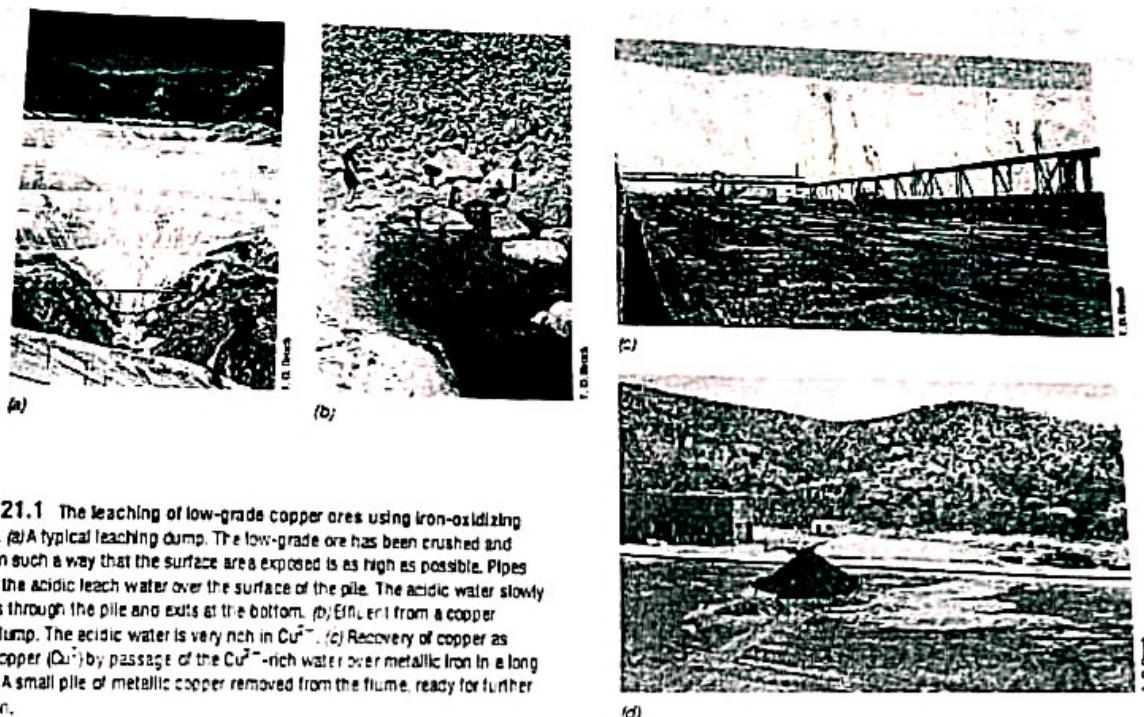


Figure 21.1 The leaching of low-grade copper ores using iron-oxidizing bacteria. (a) A typical leaching dump. The low-grade ore has been crushed and dumped in such a way that the surface area exposed is as high as possible. Pipes distribute the acidic leach water over the surface of the pile. The acidic water slowly percolates through the pile and exits at the bottom. (b) Effluent from a copper leaching dump. The acidic water is very rich in Cu^{2+} . (c) Recovery of copper as metallic copper (Cu^0) by passage of the Cu^{2+} -rich water over metallic iron in a long flume. (d) A small pile of metallic copper removed from the flume, ready for further purification.

Figure 1 : lixiviation de minerais à faible teneur en cuivre à l'aide de bactéries. (a) Site typique de lixiviation. Le minerai à faible teneur a été concassé et entassé de telle sorte que la surface exposée soit aussi haute que possible. Des tuyaux distribuent la solution acide à la surface du terril. La solution acide percole lentement au travers du tas de minerai et s'en échappe à la base. (b) effluent d'un lessivage de cuivre. L'eau acide est très riche en cuivre dissous. (c) le cuivre dissous est récupéré en faisant passer l'eau riche en cuivre sur du fer (Fe^0) dans un long caniveau. (d) un petit tas de cuivre métal récupéré à la sortie du caniveau est prêt pour les étapes suivantes de purification.

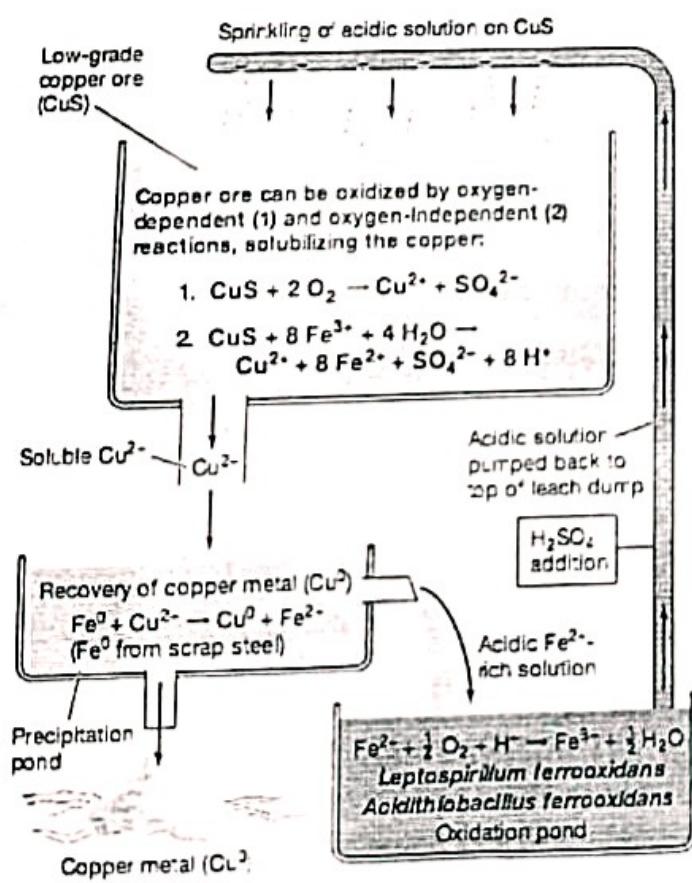


Figure 2 : Representation schématique d'un terril de lixiviation et réactions impliquées dans la biolixiviation des minerais de sulfures de cuivres pour l'obtention du Cu^0 . La réaction 1 est à la fois biologique et chimique. La réaction 2 est strictement chimique, mais il s'agit de la réaction la plus importante dans le processus de biolixiviation du cuivre. Notez comme il est essentiel pour la réalisation de la réaction 2 que le Fe^{2+} produit (par oxydation du CuS en sulfate) soit oxydé en retour en Fe^{3+} par *Acidithiobacillus ferrooxidans* et *Leptospirillum ferrooxidans*.

Transformation des métaux lourds

Biodégradation du pétrole

Le pétrole est très riche en matière organique, et pour cette raison, les microorganismes attaquent facilement les hydrocarbures en conditions aérobies, lorsqu'ils sont amenés au contact de l'air et de l'humidité. Dans certaines conditions, comme dans les réservoirs de stockage, la croissance microbienne n'est pas souhaitable. Cependant, lors des déversements accidentels, la bioremédiation du pétrole est appréciée et peut être facilitée par l'addition de nutriments inorganiques. L'importance des procaryotes dans la bioremédiation du pétrole a été démontrée ces dernières années lors de plusieurs accidents pétroliers majeurs.

La décomposition des hydrocarbures

Une grande diversité de bactéries, plusieurs moisissures et levures, certaines cyanobactéries et algues vertes peuvent oxyder les produits pétroliers en aérobiose. Les pollutions pétrolières à petite échelle d'écosystèmes aquatiques et terrestres par des activités humaines ou des processus naturels sont communes. Il existe ainsi des communautés microbiennes diversifiées dans ces environnements qui utilisent le pétrole comme donneur d'électrons.

Le méthane, l'hydrocarbure le plus simple, est catabolisé seulement par un groupe spécialisé de bactéries, les methanotrophes, et ces organismes ne se développent pas sur les hydrocarbures plus lourds.

Les microorganismes oxydant le pétrole se développent rapidement sur les nappes de pétrole. L'activité d'oxydation du pétrole est plus intense si la température et les nutriments inorganiques (surtout l'azote et le phosphore) sont aux valeurs idéales. Le pétrole étant insoluble dans l'eau, et plus léger, il flotte à la surface et forme des nappes. Les bactéries qui l'oxydent sont souvent attachées en grand nombre aux gouttelettes d'hydrocarbures. Ces bactéries décomposent finalement le pétrole et dispersent les nappes.

Les microorganismes dégradent le pétrole en l'oxydant en CO₂. Lorsque se produit un déversement important, les fractions d'hydrocarbures volatils s'évaporent rapidement, laissant la place à des composés aliphatiques et aromatiques plus lourds offerts à la dégradation des microorganismes. En dégradant les hydrocarbures, les bactéries impliquées dans le processus peuvent augmenter d'un facteur 10³ à 10⁶ peu de temps après le déversement accidentel.

Des expériences utilisant des hydrocarbures marqués comme traceurs, ou des mesures de consommation d'oxygène indicatrices de l'activité respiratoire ont montré, qu'en conditions optimales, jusqu'à 80% des composés non volatils du pétrole sont oxydés par les bactéries dans l'année qui suit l'accident pétrolier. Certaines fractions d'hydrocarbures, tels que les

hydrocarbures ramifiés et polycycliques, cependant, demeurent beaucoup plus longtemps dans l'environnement

Le pétrole déversé qui se trouve incorporé aux sédiments est dégradé lentement et peut avoir un impact significatif à long terme sur les pêcheries et activités similaires.

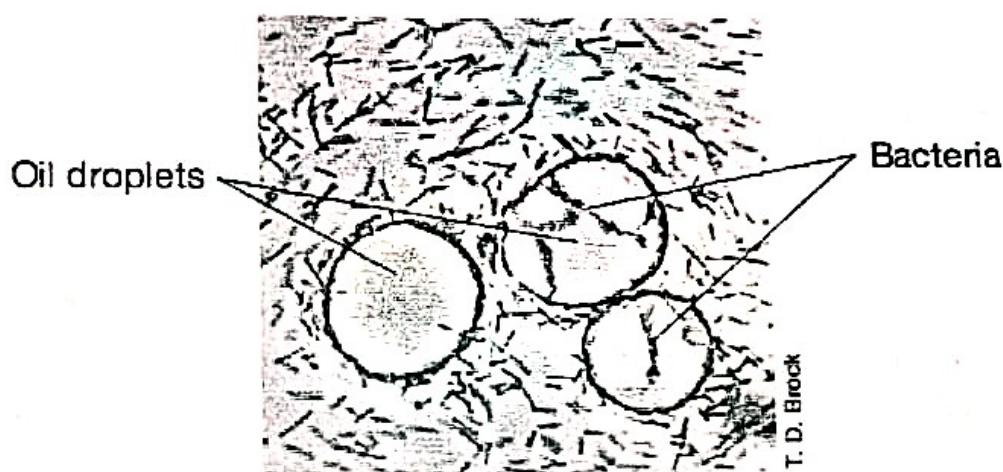
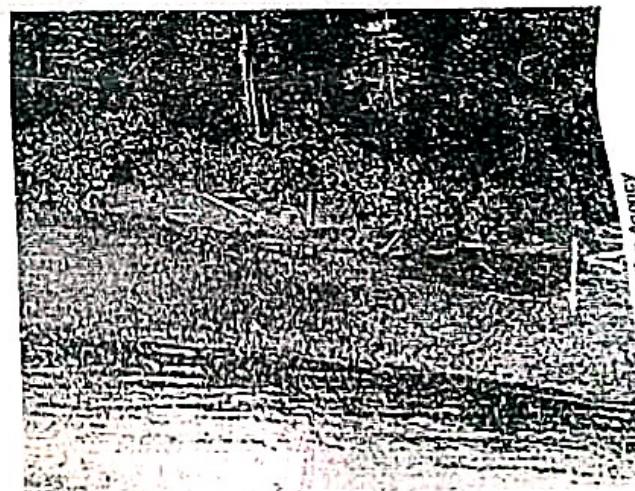


Figure 21.8 Hydrocarbon-oxidizing bacteria in association with oil droplets.

The bacteria are concentrated in large numbers at the oil–water interface, but are actually not within the droplet itself.



(a)



(b)

Figure 21.7 Environmental consequences of large oil spills and the effect of bioremediation. (a) A contaminated beach along the coast of Alaska containing oil from the *Exxon Valdez* spill of 1989. (b) The rectangular plot (arrow) was treated with inorganic nutrients to stimulate bioremediation of spilled oil by microorganisms, whereas areas above and to the left were untreated. (c) Oil spilled into the Mediterranean Sea from the Jiyeh (Lebanon) power plant that flowed to the port of Byblos during the 2006 war in Lebanon.

Biodégradation des xénobiotiques

Les xénobiotiques sont des composés chimiques de synthèse qui n'existent pas naturellement. Parmi les xénobiotiques, on trouve les pesticides, les polychloro-biphenyls (PCBs, utilisés dans l'industrie électrique), colorants, solvants chlorés et beaucoup d'autres. De nombreux xénobiotiques ont une structure chimique proche de celles de composés naturels. Cependant, certains xénobiotiques diffèrent tellement, chimiquement parlant des composés auxquels les microorganismes sont confrontés naturellement, qu'ils ne sont dégradés qu'extrêmement lentement, voire pas du tout. Les pesticides sont un bon exemple des possibilités de dégradation des microorganismes.

Catabolismes des pesticides

Les pesticides sont parmi les xénobiotiques les plus largement distribués et sont trouvés fréquemment dans les rejets toxiques. Plus de 1000 pesticides ont été mis sur le marché dans le but de contrôler chimiquement les organismes nuisibles. On y trouve des herbicides, insecticides et fongicides. Les pesticides appartiennent à des familles chimiques variées, et parmi eux des composés chlorés, des noyaux aromatiques, des composés azotés et phosphorés et beaucoup d'autres. Certaines de ces substances sont des sources de carbone et des donneurs d'électrons convenables pour des microorganismes du sol, d'autres non.

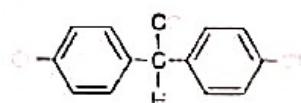
Si une substance peut être attaquée par des microorganismes, elle peut finalement disparaître du sol. De telles dégradations sont souhaitables car elles évitent l'accumulation de substances toxiques dans le sol. Cependant, des composés relativement proches peuvent fortement différer dans leur biodégradabilité. Aussi, quelques composés persistent relativement intacts pendant des années, tandis que d'autres sont significativement dégradés en seulement quelques semaines ou quelques mois.

Les taux relatifs de rémanence des xénobiotiques sont seulement approximatifs car de nombreux facteurs environnementaux_ température, pH, aération, teneur en matière organique du sol_ influencent aussi la décomposition. Certains insecticides chlorés sont si récalcitrants qu'ils peuvent persister plus de 10 ans. Cependant, même la disparition complète d'un pesticide d'un écosystème ne signifie pas nécessairement qu'il a été dégradé par les microorganismes ; la perte d'un pesticide peut aussi se produire par évaporation, lessivage, ou dégradation chimique spontanée.

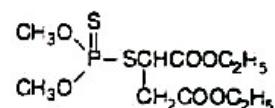
La biodisponibilité pilote aussi d'une certaine façon l'attaque microbienne de composés xénobiotiques. De nombreux xénobiotiques sont assez hydrophobes et donc pas très solubles dans l'eau.

L'adsorption de ces composés sur la matière organique et l'argile dans le sol et les sédiments diminue l'accessibilité aux microorganismes. L'addition de surfactants ou d'émulsifiants augmente souvent la biodisponibilité et finalement la biodégradation du composé xénobiotique.

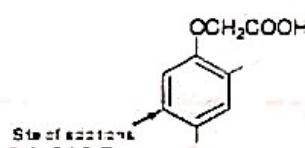
De nombreux organismes métabolisent les pesticides et les herbicides y compris plusieurs genres de bactéries et de champignons. Certains pesticides constituent à la fois des sources de carbone et d'énergie, et peuvent être oxydés en CO₂. Cependant, d'autres composés sont attaqués seulement faiblement ou pas du tout. Certains composés peuvent être dégradés partiellement ou en totalité, à condition qu'une autre substance organique soit présente en tant que source d'énergie primaire. Ce phénomène se nomme cométabolisme ou cooxydation. Cependant, si la dégradation est seulement partielle, le produit de la dégradation microbienne d'un pesticide peut parfois être même plus毒ique que le composé original.



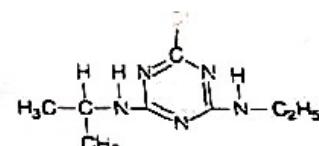
DDT, dichlorodiphenyltrichloroethane
(an organochlorine)



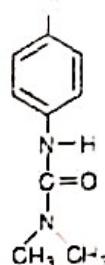
Malathion, mercaptosuccinic acid diethyl ester
(an organophosphate)



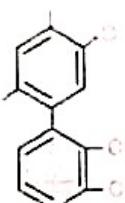
2,4-D, 2,4-dichlorophenoxy-acetic acid



Atrazine, 2-chloro-4-ethylamino-6-isopropylamino-1,3,5-triazine



Monuron,
3-(4-chlorophenyl)-
1,1-dimethylurea
(a substituted urea)



Chlorinated biphenyl (PCB), Trichloroethylene
shown is 2,3,4,2',4',5'-hexachlorobiphenyl

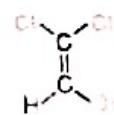
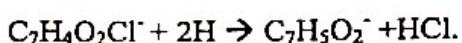


Figure 21.10 Examples of xenobiotic compounds. Although none of these compounds exist naturally, microorganisms exist that can break them down.

La respiration anaérobie des composés chlorés

La déchloration réductrice est une forme de respiration anaérobie. Au cours de ce procédé, les composés organo-chlorés sont employés comme accepteurs terminaux d'électrons en

conditions anaérobies. La réduction du chlorobenzoate en benzoate par la bactérie *Desulfonile* est un bon modèle de laboratoire pour l'étude de la déchlororation réductrice :



Du point de vue de la bioremédiation, d'autres composés chlorés sont écologiquement plus importants que le chlorobenzoate. Par exemple, la déchlororation réductrice peut se produire avec les composés dichloro-, trichloro-, et tétrachloro- (perchloro-) éthylène, chloroforme, dichlométhane, certains polychloro-biphényles (PCBs) et de nombreux composés bromés et fluorés. Ces composés sont toxiques dont certains (particulièrement le trichloroéthylène) ont été associés au cancer, sont largement utilisés comme solvants industriels, agents dégraissants et isolants dans les transformateurs électriques. Ils pénètrent dans les environnements anoxiques lors de déversements accidentels, ou à la suite de fuites lentes de réservoirs de stockage, ou de transformateurs abandonnés. Finalement, ils atteignent les nappes souterraines, où ils constituent les contaminants les plus fréquemment détectés dans les nappes phréatiques.

Il existe plusieurs genres bactériens capables de déchlororation qui peuvent transformer de nombreux composés chlorés en métabolites inoffensifs. Il est extrêmement intéressant de stimuler les activités de bioremédiation de ces procaryotes en tant que stratégie pour l'élimination de ces composés très toxiques de l'environnement.

La déchlororation aérobie des composés chlorés est aussi possible. Des mécanismes biochimiques impliquant l'oxygène sont mis en œuvre. Dans ces conditions, la déchlororation de composés chlorés aromatiques se produit grâce à des enzymes nommées oxygénase. Dans la déchlororation aérobie du pesticide 2,4,5-T, après la déchlororation, une dioxygénase rompt le noyau aromatique. Ceci génère des composés qui sont métabolisés via le cycle de l'acide citrique

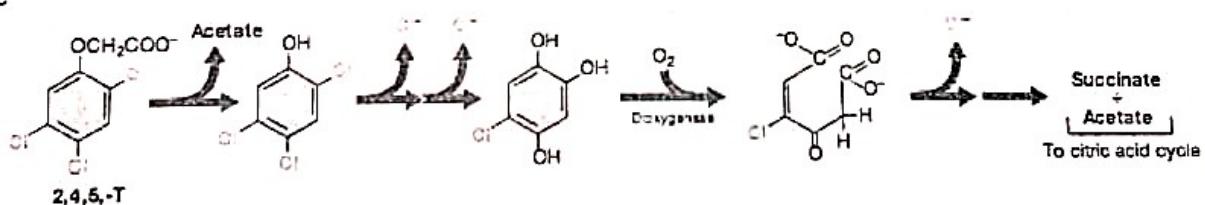


Figure 21.11 Biodegradation of the herbicide 2,4,5-T. Pathway of aerobic 2,4,5-T biodegradation; note the importance of a dioxygenase enzyme (O_2) (Section 13.22) in the degradation process.

Bien que la dégradation aérobie des xénobiotiques chlorés soit sans aucun doute importante sur le plan écologique, la déchlororation réductive revêt un intérêt environnemental en raison de la rapidité avec laquelle les conditions anaérobies peuvent se mettre en place dans les habitats naturels microbiens pollués et des contraintes biochimiques qui s'en suivent sur les organismes aérobies

La biodégradation des plastiques

Un domaine majeur des questions environnementales, au-delà de la dégradation des déchets toxiques comme les pesticides et autres hydrocarbures chlorés, est le devenir des déchets solides et particulièrement des plastiques. Les décharges sont pleines de papiers, nourritures, gravas et plastiques. Les taux de dégradation de ces matières sont en général très bas car les conditions, manque d'oxygène et d'humidité, ne permettent pas une activité microbienne rapide. De plus, des produits comme les plastiques sont de nature récalcitrants à la dégradation.

L'industrie des plastiques produit en moyenne près de 40 milliards de kilos de plastiques par an, dont environ la moitié est déversée dans les décharges. Les plastiques sont des polymères xénobiotiques de types variés : polyéthylène, polypropylène et polystyrène par exemple. Beaucoup de ces polymères synthétiques restent pratiquement inaltérés pendant des décades dans les décharges.

Ce problème a alimenté la recherche de substituts biodégradables, les biopolymères. Certains ont connu un réel succès commercial, et parmi eux les polymères photodégradables et contenant de l'amidon, et les plastiques microbiens

Les plastiques photobiodégradables sont des polymères dont la structure est altérée par l'exposition aux radiations ultraviolettes du soleil, ce qui donne des polymères sensibles à l'attaque microbienne. L'amidon est incorporé dans certains plastiques comme liaison entre des fragments courts d'un deuxième polymère biodégradable. Cette configuration accélère la biodégradation car les bactéries amylolytiques du sol attaquent l'amidon, libérant les fragments de polymères qui sont alors dégradés par d'autres microorganismes. Les plastiques synthétisés par voie microbiennes sont calqués sur le polymère de stockage poly- β -hydroxyalcanoate (PHA). Les PHA possèdent plusieurs propriétés générales des plastiques synthétiques et peuvent être synthétisés selon des formules chimiques variées. Un copolymère contenant approximativement des quantités égales de PHB (poly- β -hydroxybutirate) et de PHV (poly- β -hydroxyvalérat) a connu un grand succès commercial à ce jour dans ce domaine. Cependant, parce qu'ils sont plus rentables économiquement, les plastiques dérivés du pétrole occupent pratiquement tout le marché actuel des plastiques.

Le mercure et transformations des métaux lourds

Les métaux sont présents en faibles concentrations dans les roches, les sols, les eaux et l'atmosphère. Certains de ces éléments traces (cobalt, cuivre, zinc, nickel, molybdène) sont indispensables aux cellules. À de fortes concentrations cependant, ces mêmes métaux peuvent être toxiques aux organismes vivants. Parmi eux, certains sont suffisamment volatils pour

contaminer également l'air. Il s'agit du mercure, du plomb, de l'arsenic, du cadmium et du sélénium.

Beaucoup de métaux lourds font l'objet de réactions d'oxydo-réductions catalysées par les microorganismes. Plusieurs sont aussi convertis en une forme organique suite à l'activité microbienne. En raison des conséquences environnementales et du rôle significatif des microorganismes, l'accent sera porté sur la biogéochimie du mercure.

Le cycle du mercure et le méthyl-mercure

Bien que le mercure soit présent en très faibles concentrations dans la plupart des environnements naturels avec une moyenne d'environ 1ng par litre, il est largement employé dans des processus industriels et est le principe actif de de nombreux pesticides. En raison de sa propension inhabituelle à se concentrer dans les tissus vivants et de sa forte toxicité, le mercure a une importance environnementale considérable. Par exemple, l'exploitation des minerais de mercure et la combustion des combustibles fossiles libèrent environ 40 000 tonnes de mercure dans l'environnement chaque année. Une plus grande quantité est même libérée par les processus géochimiques naturels. Le mercure est aussi un sous produit des industries électroniques, particulièrement la production de piles et de câbles, de l'industrie chimique et de l'incinération des déchets.

La principale forme de mercure dans l'atmosphère est le mercure élémentaire Hg⁰, volatil, et oxydé par photochimie en ion Hg²⁺ (cycle). L'ion mercurique s'adsorbe facilement sur la matière particulaire et peut alors être métabolisé par les microorganismes. L'activité microbienne conduit à la méthylation du mercure, ce qui donne du méthyl-mercure (CH₃Hg⁺). Du point de vue métabolique, la méthylation du mercure s'effectue par transfert de groupes méthyle à partir de méthyl-B12. Le méthyl-mercure est particulièrement toxique car il peut être absorbé au travers de la peau. Mais de plus, il est soluble et peut être concentré au long de la chaîne alimentaire en milieu aquatique, principalement chez les poisson. Le méthyl mercure peut ensuite à nouveau méthylé par microorganismes pour donner le composé volatile diméthyl-mercure (CH₃-Hg-CH₃).

Le méthyl-mercure et le diméthyl-mercure s'accumule dans les tissus animaux et en particulier dans les muscle. Le méthyl-mercure est environ 100 fois plus毒ique que Hg⁰ ou Hg⁺, et se concentre chez les poisson pour qui il est un puissant neurotoxique. Le méthyl-mercure constitue donc une toxine environnementale majeure, et son accumulation semble être particulièrement problématique dans les lacs d'eau douce où de fortes concentrations de méthyl-mercure ont été observées chez des poissons destinés à l'alimentation humaine. Le méthyl-mercure

mercure peut aussi provoquer des dommages au niveau du foie et des reins chez l'homme et les animaux.

Plusieurs autres transformations du mercure se produisent à l'échelle globale, incluant des réactions impliquant les bactéries sulfato-réductrices ($H_2S + Hg^{2+} \rightarrow HgS$) et méthanogènes ($CH_3Hg^+ \rightarrow CH_4 + Hg^0$)

La solubilité de HgS est très faible, aussi dans les sédiments anoxiques où se déroule la sulfato-réduction, la plupart du mercure se trouve sous forme de HgS . mais en cas d'aération, l'oxydation de HgS se produit, principalement sous l'influence des thiobacilles, ce qui conduit à la formation de Hg^{2+} et SO_4^{2-} , et finalement de méthyl-mercure.

La résistance au mercure

A des concentrations suffisamment élevées, Hg^{2+} et CH_3Hg^+ peuvent être non seulement toxiques pour les organismes complexes, mais aussi pour les microorganismes. Cependant, plusieurs bactéries peuvent réaliser la biotransformation de formes toxiques du mercure en forme non toxiques. Chez les bactéries Gram négatif résistantes au mercure, une enzyme liée au NADPH nommée réductase mercurique réduit Hg^{2+} en Hg^0 . L' Hg^0 produit dans cette réaction est volatil, mais n'est pas toxique pour l'homme et les microorganismes. La conversion bactérienne de Hg^{2+} en Hg^0 permet à davantage de CH_3Hg^+ d'être converti en Hg^{2+} .

Chez la bactérie Gram négatif *Pseudomonas aeruginosa*, les gènes impliqués dans la résistance au mercure sont portés par un plasmide. Ces gènes, les gènes mer, sont organisés en opéron sous le contrôle de la protéine régulatrice MerR. Il est intéressant de noter que MerR fonctionne à la fois comme un répresseur et comme un activateur. En l'absence de Hg^{2+} , MerR se fixe à la région opératrice de l'opéron mer, et empêche la transcription des gènes merTPCAD. Cependant lorsque Hg^{2+} est présent, il forme un complexe avec MErR, qui fonctionne alors comme un activateur de transcription de l'opéron mer.

La protéine MerP est une protéine périplasmique se fixant à Hg^{2+} . MerP se fixe à Hg^{2+} et le transfert à une protéine membranaire MerT, qui transporte Hg^{2+} dans la cellule en vue de la réduction par la réductase mercurique. Le résultat final est la réduction de Hg^{2+} en Hg^0 , qui est volatil et s'échappe de la cellule

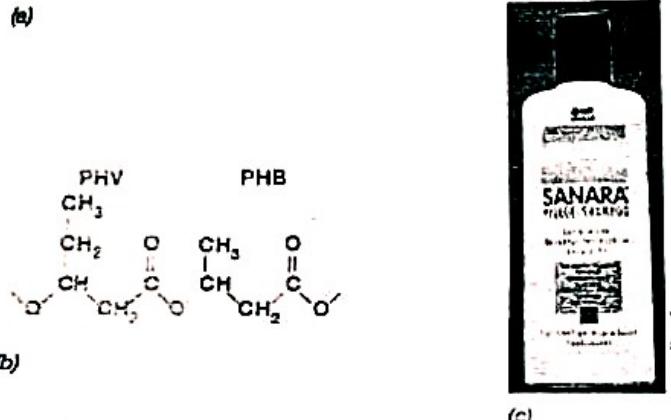
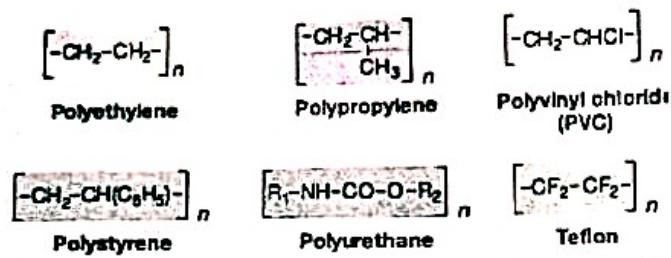


Figure 21.12 Synthetic and microbial plastics. (a) The monomeric structure of several synthetic plastics. (b) Structure of the copolymer of poly- β -hydroxybutyrate (HB) and poly- β -hydroxyvalerate (PHV). (c) A brand of shampoo previously marketed in Germany and packaged in a bottle made of the PHB-PHV copolymer.

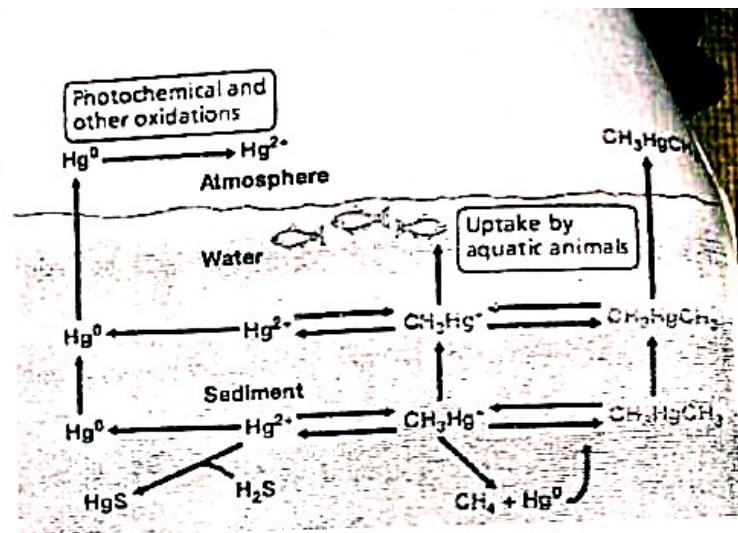


Figure 20.16 Biogeochemical cycling of mercury. The major reservoirs of mercury are water and sediments. Mercury in water can be concentrated in animal tissues; it can be precipitated as HgS from sediments. The forms of mercury commonly found in aquatic environments are each shown in a different color.

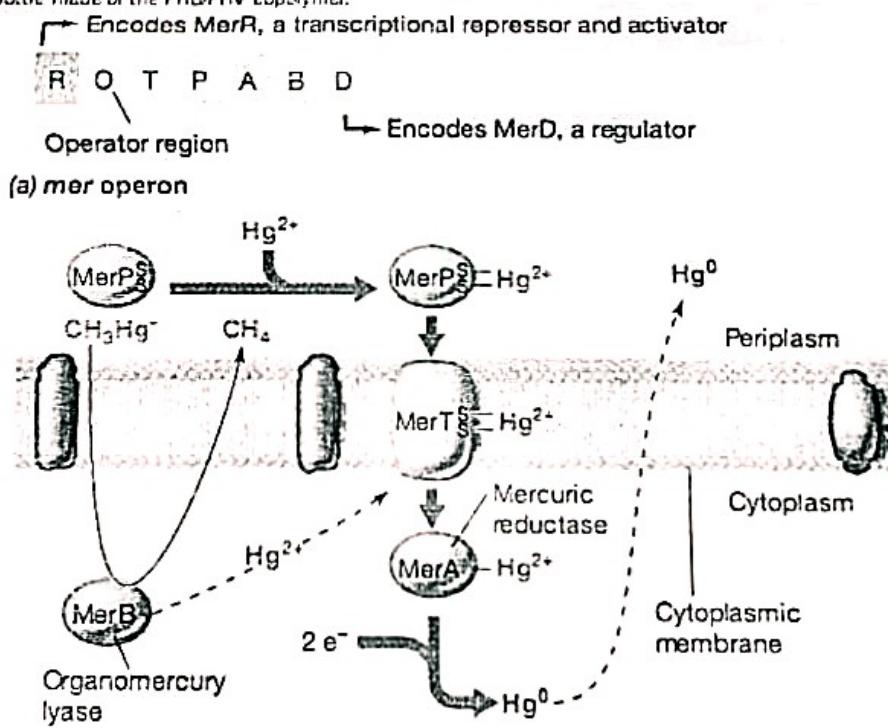


Figure 20.17 Mechanism of mercury transformations and resistance.

(a) The *mer* operon. MerR can function as either a repressor (in the absence of Hg^{2+}) or a transcriptional activator (in the presence of Hg^{2+}). (b) Transport and reduction of Hg^{2+} and CH_3Hg^+ ; the Hg^{2+} is bound by cysteine residues in the MerP and MerT proteins. MerA is the enzyme mercuric reductase and MerB is organomercury lyase.

Bio-industries microbien

La production du pétrole

La production d'hydrocarbures se produit grâce à l'action de certains algues vertes. Par exemple, chez l'algue coloniale *Botryococcus braunii*, la croissance s'accompagne de l'excrétion d'hydrocarbures à longues chaînes (C30-C36) qui ont la consistance du pétrole (figure 3). Chez *Botryococcus braunii*, environ 30% du poids sec des cellules est du pétrole, et l'utilisation de cet organisme ainsi que d'autres algues productrices, comme source alternatives de pétrole, ont été envisagées. Il est certain que le pétrole de certaines formations de schistes bitumineux a pour origine des algues vertes comme *Botryococcus braunii*, qui se sont développés par le passé au fond des lacs.

Bioplastique

Le plastique microbien est un bioplastique biodégradable. Les polyhydroxyalcanoates (PHAs) sont des polymères de stockage bactériens, ils possèdent plusieurs propriétés proches des plastiques (consistance, force et aspect) mais ils demeurent chers par rapport au plastique dérivé du pétrole.

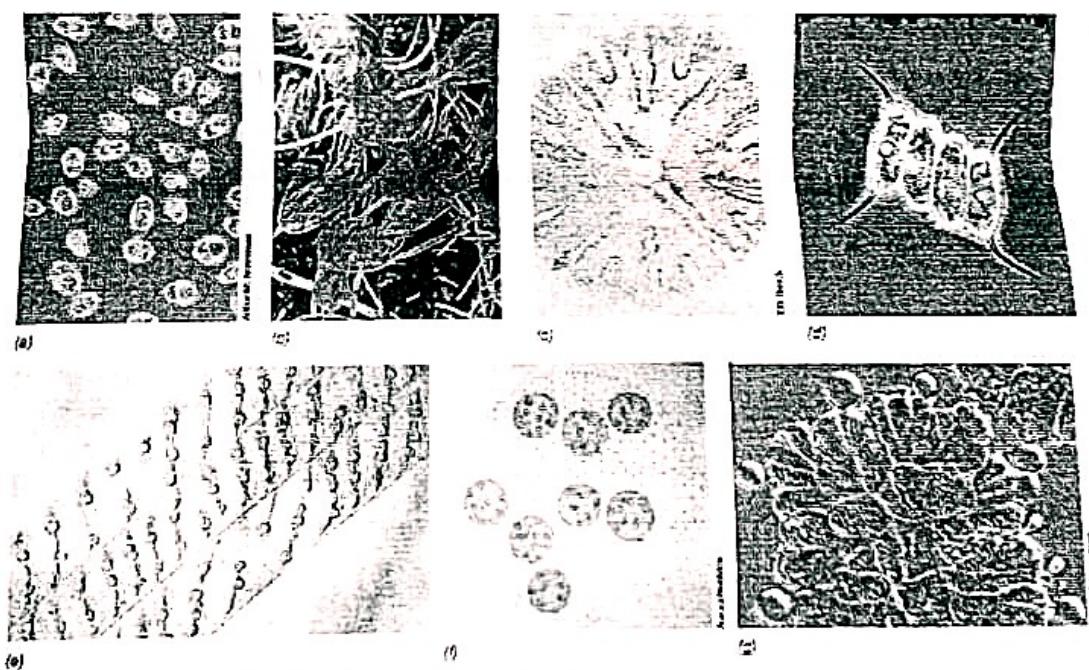


Figure 17.33 Green algae. (a) A single cell, flagellated green alga, *Dunaliella*. A cell about 5 µm wide. (b) The plant-like green alga, *Chara*. (c) *Microcoleus*. This single multicellular cell is about 100 µm wide. (d) *Scenedesmus*, showing packets of four cells each. (e) *Spirogyra*, a filamentous alga with cells about 20 µm wide. Note the green spiral-shaped chloroplasts. (f) *Volvocales* colony with eight daughter colonies. (g) The petroleum-producing green alga, *Botryococcus braunii*. Note the excreted oil droplets surrounding the cell.

Figure 3

Les fermentations

Beaucoup de biotopes deviennent facilement anoxiques parce que l'oxygène n'est pas soluble dans l'eau. Dans de tels environnements, la décomposition de la matière organique doit se produire de façon anaérobie. Si dans de tels milieux anoxiques, les accepteurs d'électrons

(SO_4^{2-} , NO_3^- , Fe^{3+} ...) ne sont pas disponibles en quantité suffisante, une grande partie du carbone sera catabolisée par fermentation.

La fermentation est définie comme étant l'ensemble des réactions biochimiques, anaérobies, d'oxydation et de réduction procurant à l'organisme l'énergie nécessaire à ses biosynthèses, grâce à des phosphorylations non couplées au processus membranaires de phosphorylation oxydative, mais ayant lieu uniquement dans le cytoplasme, au niveau du substrat : des groupements phosphates riches en énergie, liés à des composés intermédiaires organiques, sont transférés à l'ADP. Parmi ces composés riches en énergie figure l'acetyl CoA.

Compound	Free energy of hydrolysis, ΔG° (kJ/mol) ^b
Acetyl-CoA	-35.7
Propionyl-CoA	-35.6
Butyryl-CoA	-35.6
Caproyl-CoA	-35.6
Succinyl-CoA	-35.1
Acetyl phosphate	-44.8
Butyryl phosphate	-44.8
1,3-Bisphosphoglycerate	-51.9
Carbamyl phosphate	-39.3
Phosphoenolpyruvate	-51.6
Adenosine phosphosulfate (APS)	-88
$\text{N}^{10}\text{-Formyltetrahydrofolate}$	-23.4
Energy of hydrolysis of ATP (ATP \rightarrow ADP + P)	-31.8

La fermentation n'existe pas chez les bactéries aérobies (absence de voies métaboliques fermentaires). Les bactéries fermentaires mettent en jeu en anaérobiose, toutes les voies de fermentation dont elles disposent.

En anaérobiose, les bactéries fermentaires sont toutes des bactéries anaérobies strictes et aéro/anaérobies facultatives.

En aérobiose, seules les bactéries anaérobies facultatives aérotolérantes peuvent produire leur énergie par fermentation, alors que les bactéries anaérobies strictes et aéro/anaérobies facultatives ont les voies fermentaires réprimées en aérobiose.

Comparaison entre la respiration aérobie, anaérobie et la fermentation

	Réspiration aérobie	Réspiration anaérobie	fermentation
Oxygène	Requis	non	non
Phosphorylation	Oxydative et au niveau du substrat	Oxydative et au niveau du substrat	Au niveau du substrat
Accepteur final d'e-	O_2	SO_4^{2-} , NO_3^- , Fe^{3+}	Molécules organiques
ATP produits	36-38	2-36	2

Les produits de fermentations

Ex. Les antibiotiques

De nombreux antibiotiques sont produits par les microorganismes, surtout par les actinomycètes du genre *Streptomyces*, et par les champignons filamenteux. La synthèse de la pénicilline et de ces dérivés illustre le rôle essentiel de la mise au point du milieu et du contrôle des conditions de culture dans la production de ces composés.

La pénicilline produite par *Penicillium chrysogenum* est un excellent exemple d'une fermentation pour laquelle on ajuste soigneusement la composition du milieu pour atteindre des rendements maximums. La pénicilline G est produite en fermenteurs de 40000-200000 litres. C'est un processus hautement aérobie où on utilise la liqueur de maïs comme source de C et N.

La pénicilline est produite au début de la phase stationnaire où les sources de carbone et d'azote commencent à s'épuiser. Le fait de fournir du lactose, disaccharide hydrolysé lentement, tout en limitant l'azote disponible, stimule l'accumulation de pénicilline après l'arrêt de la croissance.

Lorsque le lactose devient limitant, et la densité cellulaire très haute, on nourrit avec de faibles concentrations de glucose. Ceci maximise le rendement en pénicilline.

Lorsque la fermentation est terminée, normalement au bout de 6 à 7 jours, le milieu est séparé du mycélium et traité par absorption, précipitation et cristallisation, pour donner la substance finale. Ce produit de base peut ensuite être modifié par des techniques chimiques pour donner une variété de pénicillines semi-synthétiques afin d'élargir le spectre d'activité. Ex. Ampicilline et Méthicilline).

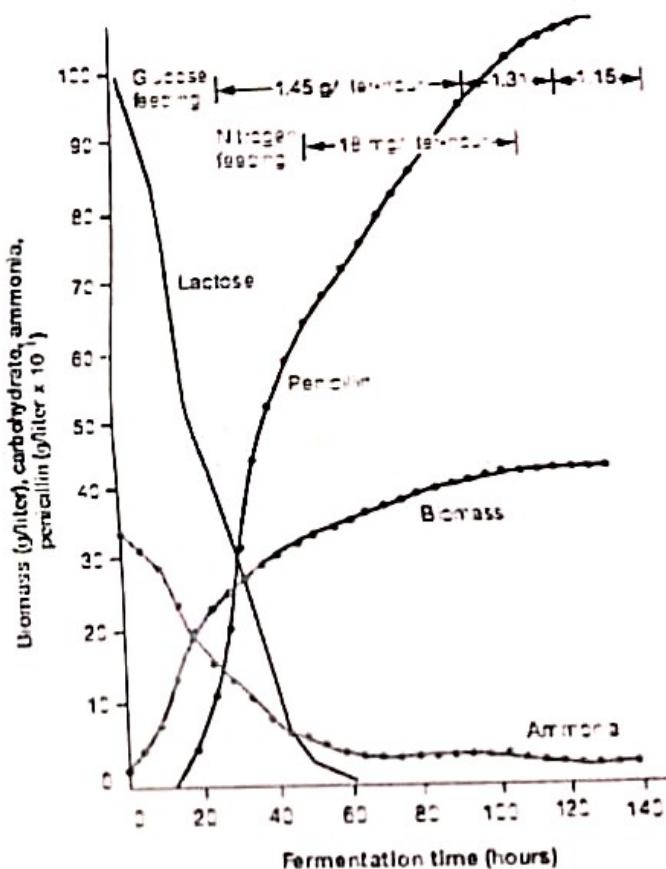


Figure 16.18 Penicillin Fermentation Involves Precise Control of Nutrients. The synthesis of penicillin begins when ammonia becomes limiting. After most of the lactose is converted to disaccharide, glucose is added along with a low level of nitrogen. The rates of maximum transformation of the carbon sources to penicillin scale factor is presented using the conversion recommended by the American Society for Microbiology. That is, a number on the axis is to be divided by 0.10 to obtain the true value.