

1 - Les microorganismes photo-litho-autotrophes

Les cellules photolithoautotrophes utilisent l'énergie rayonnante d'origine solaire comme source d'énergie, le CO₂ atmosphérique comme source de C, et la matière minérale comme source d'électrons.

La photosynthèse oxygénique :

Les Cyanobactéries vivent dans les eaux douces ou marines. Elles contiennent des saccules ou thylakoïdes, dont la membrane renferme 2 photosystèmes, PS I (analogue au PS unique des Bactéries photosynthétiques vertes) et PS II (analogue au PS unique des Bactéries photosynthétiques pourpres). Elles pratiquent une photosynthèse oxygénique, c'est-à-dire qu'elles produisent et libèrent dans le milieu du O₂, produit secondaire de leur métabolisme. L'équation générale de la photosynthèse est la même qu'en ce qui concerne les végétaux chlorophylliens (« algues », Embryophytes) :

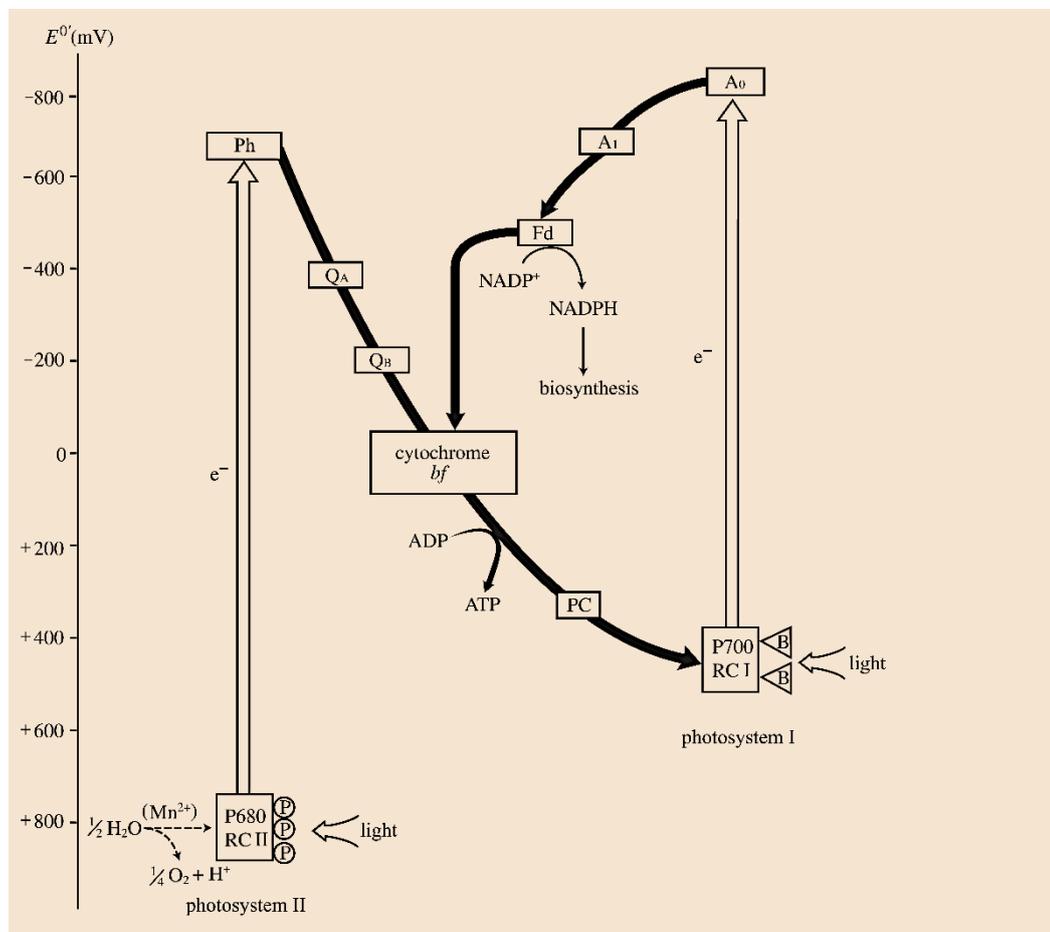
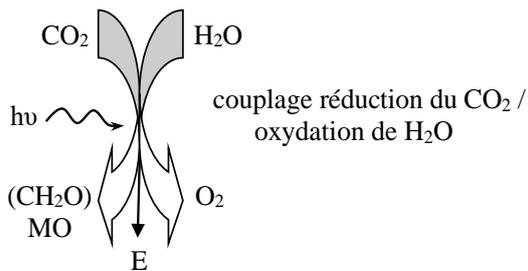
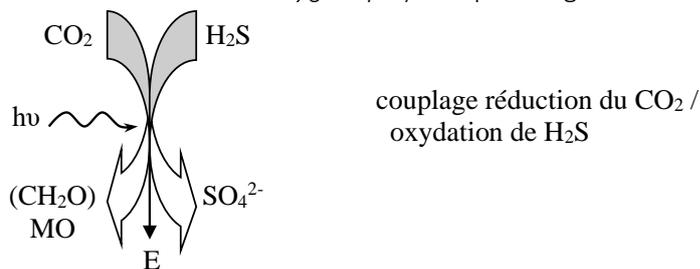


Fig. Chaînes de transport d'électrons photosynthétiques des cyanobactéries.

La photosynthèse anoxygénique

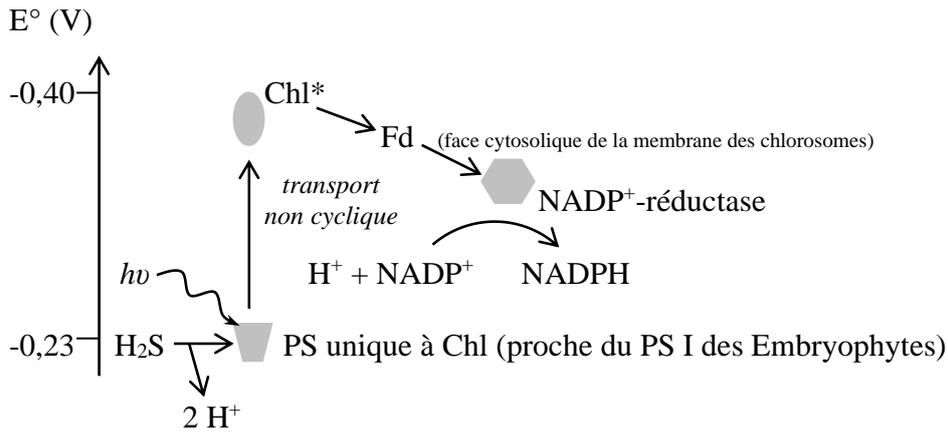
Les Bactéries photosynthétiques pourpres vivent dans les eaux ou les boues sulfureuses (Thiorhodobactériales = Bactéries pourpres sulfuraires : *Thiospirillum*). Elles pratiquent une photosynthèse *anoxygénique* (ni oxydation de l'eau, ni production de O_2). Ces cellules contiennent, en plus des bactériochlorophylles, des caroténoïdes (les bactériopurpurines) qui masquent la couleur verte et confère une couleur pourpre aux cellules. Les pigments assimilateurs sont localisés dans un système membranaire dépendant de la membrane plasmique.

Les Bactéries photosynthétiques vertes vivent dans les eaux et les boues sulfureuses (Thiobactériales = Bactéries vertes sulfuraires : *Chlorobium*). Le donneur de H^+ et d'électrons est le sulfure d'hydrogène (hydrogène sulfuré) H_2S . La photosynthèse s'effectue sans production de O_2 (photosynthèse *anoxygénique*). L'équation générale de la photosynthèse devient :



Les Bactéries photosynthétiques vertes possèdent des bactériochlorophylles a, b, c et d qui donnent leur couleur verte aux cellules. Les molécules de chlorophylles sont localisées dans la membrane de vésicules du cytoplasme périphérique, les chlorosomes. Ces cellules utilisent l'énergie rayonnante pour transférer 1 H^+ et 1 électron de H_2S au $NADP^+$; elles engendrent ainsi le pouvoir réducteur nécessaire à la fixation du C. Le potentiel redox des électrons de H_2S (-0,23 V) est beaucoup plus faible que celui de l'eau (+ 0,82V), ce qui fait que l'absorption d'un quantum d'énergie par le seul photosystème de ces cellules est suffisant pour atteindre un potentiel redox assez élevé pour produire le NADPH.

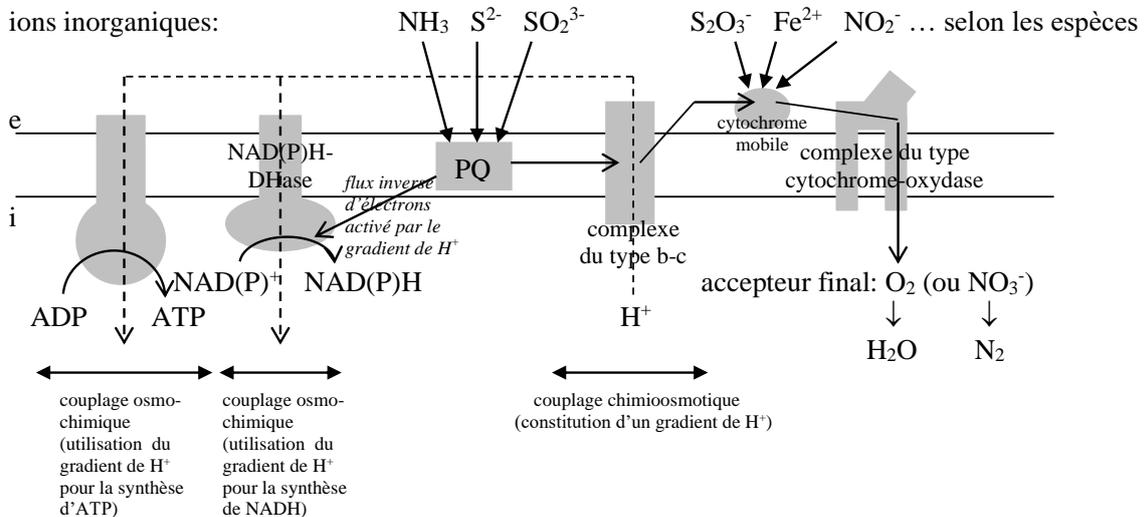
Le transport des électrons est *non cyclique* : la réduction du $NADP^+$ est catalysée par une $NADP^+$ réductase. Le soufre, produit secondaire du métabolisme des Bactéries vertes sulfuraires, s'accumule à l'*extérieur* des cellules :



2 - Les microorganismes chimio-litho-autotrophes

Les Bactéries chimio-lithoautotrophes tirent leur énergie de l'oxydation de composés minéraux, utilisent le CO_2 comme source de C, des composés minéraux variés comme source de pouvoir réducteur, H^+ et d'électrons (substrat à oxyder = *carburant*), des accepteurs d'électrons variés (accepteur à réduire = *comburant*). Le pouvoir réducteur des ions inorganiques étant trop faible pour être utilisé pour la réduction du CO_2 , toutes ces Bactéries possèdent des enzymes membranaires telle que la NADH-déshydrogénase : le flux des électrons cédés par les ions inorganiques provoque le pompage de H^+ hors de la cellule (création d'une force protomotrice) ; leur retour dans la cellule active à la fois l'ATP-synthase et la NADH-DHase (réduction de NAD^+ ou NADP^+ grâce aux électrons issus du flux inverse activé par le gradient de H^+). L'accepteur final est le plus souvent le O_2 (espèces aérobies) mais aussi les NO_3^- dans le cas d'espèces anaérobies (*Thiobacillus denitrificans*, *Pseudomonas*) : on parle de « *respiration nitrate* » :

:

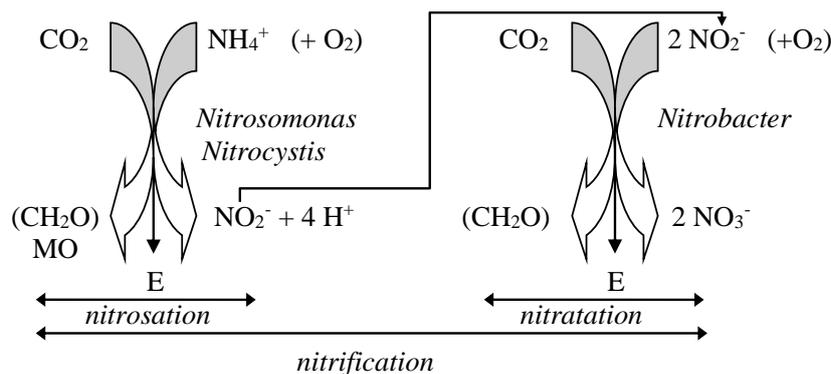


Tab. Réactions redox dans les bactéries chimolithotrophes

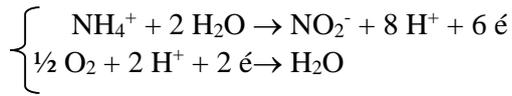
Reductant	Redox Couple ¹	E ₀ [mV]	Reactions	G ₀ [kJ*mol ⁻¹] ²	Enzymes; Cofactors	Organisms
Carbon monoxide	CO ₂ /CO O ₂ (0.21 atm)/H ₂ O	-540 +816	CO + H ₂ O → CO ₂ + 2 H ⁺ + 2 e ⁻	-261	carbon monoxide dehydrogenase	'Carboxidobacteria', e.g. <i>Pseudomonas</i>
			$\frac{1}{2} O_2 + 2 e^- + 2 H^+ \rightarrow H_2O$			
			$\Sigma = CO + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow CO_2$			
Hydrogen	2 H ⁺ /H ₂	-410	H ₂ → 2 H ⁺ + 2 e ⁻	-237	hydrogenase, [NiFe] or [Fe]	'Knallgas' bacteria
			$\frac{1}{2} O_2 + 2 e^- + 2 H^+ \rightarrow H_2O$			
			$\Sigma = H_2 + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow H_2O$			
Sulfide	S ₀ /HS ⁻	-260	HS ⁻ → S ₀ + H ⁺ + 2 e ⁻	-207	'sulfide oxidase'	<i>Thiobacillus</i> ; <i>Beggiatoa</i> ; <i>Wolinella succinogenes</i> (uses fumarate as cl.acc.)
			$\frac{1}{2} O_2 + 2 e^- + 2 H^+ \rightarrow H_2O$			
			$\Sigma = HS^- + \frac{1}{2} O_2 + H^+ \rightarrow S_0 + H_2O$			
	HSO ₃ ⁻ /HS ⁻	-110	HS ⁻ + 3 H ₂ O → HSO ₃ ⁻ + 6 H ⁺ + 6 e ⁻	-536	sulfite reductase; siroheme, FeS	<i>Thiobacillus</i> ; <i>Sulfobolus</i>
			$\frac{1}{2} O_2 + 2 e^- + 2 H^+ \rightarrow H_2O$			
			$\Sigma = HS^- + 1\frac{1}{2} O_2 \rightarrow HSO_3^-$			
Sulfur	HSO ₃ ⁻ /S ₀	-45	S _n + O ₂ + H ₂ O → S _{n-1} + HSO ₃ ⁻ + H ⁺	-332	'sulfur dioxygenase'; FeS	<i>Thiobacillus</i>
Sulfite	SO ₄ ²⁻ /HSO ₃ ⁻	-520	HSO ₃ ⁻ + H ₂ O → SO ₄ ²⁻ + 3 H ⁺ + 2 e ⁻	-258	sulfite: cytochrome c oxidoreductase; heme-Fe, Mo ⁺⁺	<i>Thiobacillus</i> (<i>T. denitrificans</i> uses NO ₃ ⁻ as electron acceptor anaerobically)
			$\frac{1}{2} O_2 + 2 e^- + 2 H^+ \rightarrow H_2O$			
			$\Sigma = HSO_3^- + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow SO_4^{2-} + H^+$			
	APS/HSO ₃ ⁻	-60	a) HSO ₃ ⁻ + AMP → APS + 2 e ⁻ b) APS + P _i → SO ₄ ²⁻ + ADP + H ⁺ c) ADP → 1/2 AMP + 1/2 ATP	~	a) adenosine phosphosulfate reductase; FAD, FeS, b) sulfate adenylyl transferase; Mg ⁺⁺ , c) adenylate kinase, Mg ⁺⁺	<i>Thiobacillus</i>
			$\frac{1}{2} O_2 + 2 e^- + 2 H^+ \rightarrow H_2O$			
			$\Sigma = HSO_3^- + \frac{1}{2} O_2 + P_i + \frac{1}{2} AMP + H^+ \rightarrow SO_4^{2-} + \frac{1}{2} ATP + H_2O$	-227		
Ammonia	NH ₂ OH/NH ₃ NO ₂ ⁻ /NH ₂ OH	+900 +60 +340	a) NH ₃ + O ₂ + 2 H ⁺ + 2 e ⁻ → NH ₂ OH + H ₂ O	-276	a) NH ₃ monoxygenase; Cu, b) hydroxylamine: cytochrome c _{55d} oxidoreductase, heme-Fe, Mo ⁺⁺	nitrosifying bacteria, e.g. <i>Nitrosomonas</i>
			b) NH ₂ OH + H ₂ O → NO ₂ ⁻ + 5 H ⁺ + 4 e ⁻			
			$\frac{1}{2} O_2 + 2 e^- + 2 H^+ \rightarrow H_2O$			
			$\Sigma = NH_3 + 1\frac{1}{2} O_2 \rightarrow NO_2^- + H_2O + H^+$			
Nitrite	NO ₃ ⁻ /NO ₂ ⁻	+430	NO ₂ ⁻ + H ₂ O → NO ₃ ⁻ + 2 H ⁺ + 2 e ⁻	-75	nitrite: cytochrome c ₅₅₀ oxidoreductase; heme-Fe, Mo ⁺⁺	nitrifying bacteria: e.g., <i>Nitrobacter</i>
			$\frac{1}{2} O_2 + 2 e^- + 2 H^+ \rightarrow H_2O$			
			$\Sigma = NO_2^- + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow NO_3^-$			
Fe ⁺⁺ at low pH (ca.2.0)	Fe ⁺⁺ /Fe ⁺⁺⁺ O ₂ (0.21 atm)/H ₂ O	+770 +1100	Fe ⁺⁺ → Fe ⁺⁺⁺	~	rusticyanin; Cu	<i>Thiobacillusferrooxidans</i> , <i>Sulfobolus</i>
			$\frac{1}{4} O_2 + e^- + H^+ \rightarrow \frac{1}{2} H_2O$			
			$\Sigma = Fe^{++} + \frac{1}{4} O_2 + H^+ \rightarrow Fe^{++} + \frac{1}{2} H_2O$	-32		
Fe ⁺⁺ at ca. neutral pH	Fe(OH) ₃ (sat.)/Fe ² (10 μmol/l)	-150	Fe ⁺⁺ + 1/4 O ₂ + 2 1/2 H ₂ O → Fe(OH) ₃ + 2 H ⁺	?	?	<i>Gallionella</i>

Les Bactéries nitrifiantes utilisent différents composés azotés ; elles participent à la minéralisation des protéines qui se réalise par étapes dans le sol.

La nitrification : NH₄⁺ → NO₂⁻ → NO₃⁻. Les Bactéries nitrifiantes sont des *aérobies strictes* (le dioxygène leur est indispensable ; elles pratiquent une *phosphorylation oxydative aérobie*) ; il en existe 2 types qui interviennent séquentiellement dans l'utilisation des composés azotés du sol :



La nitrosation est la 1^{ère} étape de la nitrification ; elle est réalisée par des Bactéries nitreuses (*Nitrosomonas* en milieu aérien, *Nitrocystis* en milieu océanique) et mène à la production de nitrites NO₂⁻ (azote nitreux) :

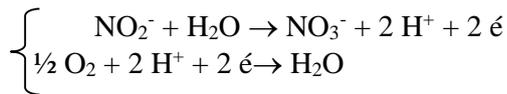


bilan :



($\Delta rG^\circ = -352 \text{ kJ}$; Winogradsky remarque en 1890 que l'oxydation de l'ammoniaque dégageait de la chaleur, ce qui permit la découverte de la chimiosynthèse).

La nitratation est la 2^{ème} étape de la nitrification ; elle est réalisée par des Bactéries nitriques (*Nitrobacter*) et mène à la production de nitrates NO₃⁻ (azote nitrique) :



bilan :



($\Delta rG^\circ = -80 \text{ kJ.mol}^{-1}$)

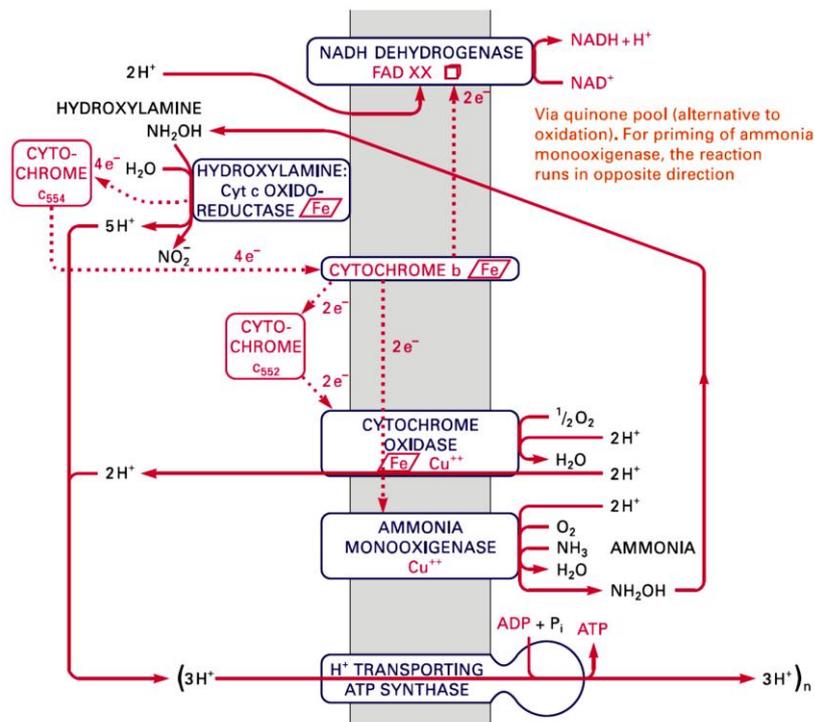
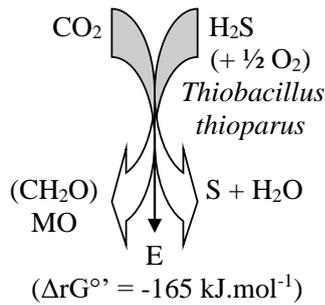
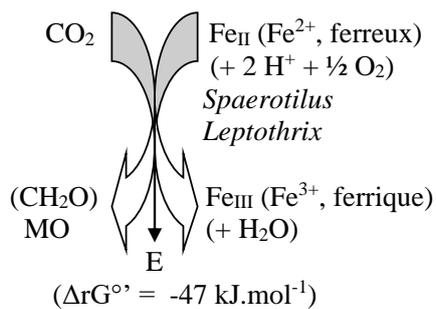


Fig. Détails du flux électronique et de l'énergie pendant l'oxydation de l'ammoniac dans les *Nitrosomonas*

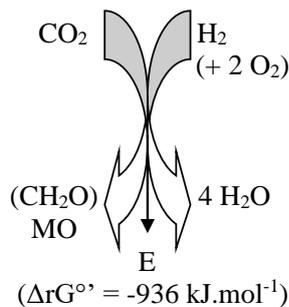
Les **Sulfobactéries**, libres ou symbiotiques, utilisent les composés *soufrés* et produisent des *sulfates* (Bactéries sulfo-oxydantes ou sulfobactéries) :



Les **Sidérobactéries** utilisent les composés *ferreux*, Fe_{II} (Fe²⁺) :



Les **Hydrogenomonas** utilisent le *dihydrogène* atmosphérique :



3 - Les microorganismes chimio-organo-hétérotrophes

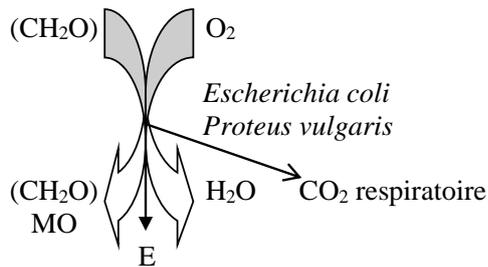
Les cellules chimio-organo-hétérotrophes utilisent la matière organique comme source d'énergie, d'électrons, et source de C.

Les cellules utilisent la matière organique préexistante à la fois comme source d'énergie, de C et de pouvoir réducteur. Les Bactéries de ce type sont les plus nombreuses et diffèrent par leurs rapports avec le dioxygène et par l'origine de la matière organique qu'elles utilisent.

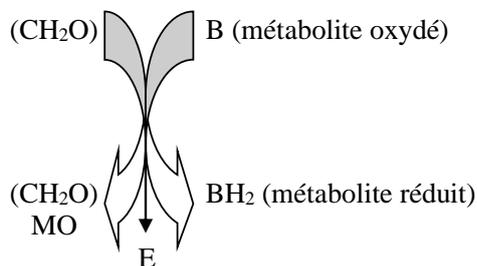
Types respiratoires

Les Bactéries *aérobies strictes* (*Escherichia coli*, *Proteus vulgaris*...) ont besoin du O₂ qui joue le rôle d'accepteur final des H⁺ et des électrons (production d'eau). Elles pratiquent la *respiration aérobie* (*idem* cellules eucaryotiques : glycolyse → décarboxylation oxydative → cycle de Krebs = cycle de l'acide citrique → chaîne de transport des électrons) ; les électrons arrachés aux substrats organiques sont pris

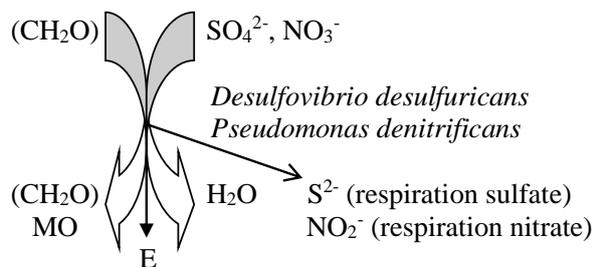
en charge par des transporteurs d'électrons (NAD^+ , FAD) qui assurent l'alimentation des pompes à protons :



Les Bactéries *anaérobies strictes* n'ont pas besoin du O_2 qui leur est toxique. Elles pratiquent la *fermentation anaérobie* : fermentation alcoolique, lactique, butyrique (*Clostridium*), propionique...



... ou la *respiration anaérobie* (Bactéries sulforéductrices ou dénitrifiantes) qui réalise la phosphorylation oxydative avec un accepteur final des e^- autre que le O_2 : sulfate, nitrate, hydrogénocarbonate... (on nomme la respiration du nom de l'accepteur final : respiration sulfate, nitrate...). La réduction des composés oxydés est réalisée par NADH qui provient de l'oxydation de MO préexistante (Glc, pyruvate).



Les Bactéries *anaérobies facultatives* pratiquent la respiration quand elles sont placées en aérobiose, la fermentation quand elles sont placées en anaérobiose (*Pseudomonas*).