

SV-E-1 poly 02

Texte du cours

Partie E : Le métabolisme cellulaire

Chapitre 1 : L'approvisionnement en matière organique

Les organismes vivants sont constitués de **matière organique** (réduite) et de **matière minérale** (oxydée), formées à partir d'éléments prélevés dans leur environnement.

La constitution et le fonctionnement d'un organisme vivant nécessitent donc de **prélever de la matière** (organique ou minérale) dans le milieu, et de former, grâce au métabolisme, ses propres constituants moléculaires à partir de ces éléments. On peut ainsi distinguer les organismes **autotrophes**, capables de synthétiser leur matière organique à partir de la réduction de la matière minérale prélevée dans le milieu, et les organismes **hétérotrophes** qui n'en sont pas capables (et forment donc leur matière organique à partir des molécules organiques prélevées dans le milieu).

Le **métabolisme** comprend, ainsi, l'**anabolisme** (réactions de synthèse de la matière organique) et le **catabolisme** (réactions de dégradation de la matière organique, qui permettent la formation de molécules énergétiques utilisables par la cellule).

Le **métabolisme** de la cellule peut être analysée selon deux grilles de lecture :

- Des **transformations de matière** : l'ensemble des réactions permettent la modification de molécules organiques, et le passage de la matière organique à la matière minérale (et vice-versa)
- Des **flux énergétiques** : l'existence de nombreuses réactions couplées permet des transferts énergétiques entre molécules

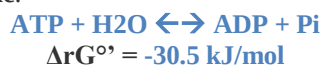
Ces deux manières de voir les choses sont bien entendu reliées entre elles.

I. Trois formes d'énergie privilégiées dans les cellules

Les réactions du métabolisme énergétique permettent des flux énergétiques, grâce à la réalisation de réactions couplées. Cette partie du cours correspond pour l'essentiel à des rappels, le seul point nouveau étant

A. Hydrolyse de l'ATP et couplages chimio-chimiques

L'hydrolyse de l'ATP en ADP + Pi est **exergonique**.



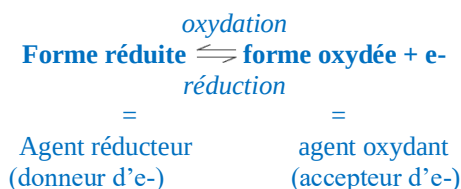
Dans les conditions cellulaires, le $\Delta_r G$ vaut entre -46 kJ/mol et -55 kJ/mol

L'ATP est ainsi un **très bon vecteur d'énergie**, car :

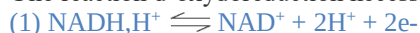
- Son **hydrolyse est favorable**.
- Dans le même temps, sa vitesse d'hydrolyse est faible : l'hydrolyse **nécessite une enzyme**, ce qui évite un gaspillage d'ATP cellulaire.
- Il a une **position énergétique « intermédiaire »** : son énergie d'hydrolyse est importante, ce qui permet de coupler cette hydrolyse avec de nombreuses réactions cellulaires ; plusieurs composés cellulaires (composés phosphorylés et thioesters) ont une énergie d'hydrolyse plus importante, ce qui permet la synthèse d'ATP.

B. Réactions d'oxydo-réductions

Une **réduction est un gain d'électron**, alors qu'une **oxydation est une perte d'électron**. Elle correspond donc au couplage de deux demi-réactions :



Une réaction d'oxydoréduction nécessite donc l'intervention, couplée, de deux couples réducteur-oxydant. Par exemple :



$$E^{\circ\prime} 1 = -0.32 \text{ V}$$



$$E^{\circ\prime} 2 = +0.82 \text{ V}$$

NADH, H⁺ et un plus fort réducteur, le dioxygène est un fort oxydant. La réaction complète est donc :



$$\Delta E^{\circ\prime} = 1.5 \text{ V} > 0$$

Un couple rédox est caractérisé par son **potentiel d'oxydoréduction** E° , qui est la différence de potentiel aux bornes d'une pile formée par le couple considéré maintenu dans les conditions standards. E° est le potentiel standard d'oxydoréduction à pH = 7.

Les couples les **plus réducteurs** sont conventionnellement affectés d'un potentiel d'oxydoréduction **négatif**. (E° faible = réducteur fort ; E° élevé = oxydant fort)

Le potentiel standard d'oxydoréduction permet de calculer la variation d'enthalpie libre :

$$\Delta rG^{\circ} = - n.F.\Delta E^{\circ}$$

n = nombre d'e- transférés
F = Faraday = 96.1 kJ/V/mol
 $\Delta E = E_2 - E_1$

$$\Delta rG^{\circ} < 0 \leftrightarrow \Delta E^{\circ} > 0$$

C. Gradients transmembranaires

Les membranes biologiques sont imperméables à certaines molécules, comme les ions. Ainsi, une différence de concentration entre deux compartiments correspond à un état de déséquilibre, dont la dissipation est exergonique : un gradient ionique représente donc une énergie potentielle, génératrice d'une force ion-motrice, fonction de la différence de concentration (part « chimique ») et de la différence de potentiel (part « électrique ») entre les deux compartiments.

$$\Delta rG_{1 \rightarrow 2} = zF(E_2 - E_1) - RT \ln \frac{C_1}{C_2} = zF(\Delta \psi) - RT \ln \frac{C_1}{C_2}$$

Dans le cas particulier d'un gradient de protons H⁺, on a :

$$pH = - \log [H^+]$$

$$\text{donc : } \ln (C_1/C_2) = 2,3(\log[H^+]_1 - \log[H^+]_2) = 2,3\Delta pH(1-2)$$

Soit :

$$\Delta rG(H^+)_{1 \rightarrow 2} = zF(\Delta \psi_{1 \rightarrow 2}) - 2,3RT\Delta pH_{1 \rightarrow 2}$$

D. Une grande diversité de couplages énergétiques

1. Notion de couplage énergétique

La cellule, pour vivre et se construire, **doit** réaliser des réactions chimiques **endergoniques** : **Il est donc nécessaire de disposer d'un processus permettant de réaliser ces réactions.**

Comme, thermodynamiquement, une réaction doit être exergonique pour se réaliser, le principe utilisé est le suivant :

- l'énergie 'libérée' par une **réaction exergonique permet** la réalisation d'une **réaction endergonique** ;
- les deux réactions (séparées d'un point de vue théorique) se réalisent **en même temps**, et forment donc **un même système** : ce système ayant une variation d'enthalpie libre ΔrG négative au cours de la réaction, son évolution dans cette direction est donc possible.

On dit alors que les deux réactions sont couplées.

La réalisation d'un couplage, quel que soit sa nature, nécessite la mise en relation de molécules diverses. Un couplage, « théoriquement réalisable » (ΔrG global négatif) ne peut donc exister de manière concrète qu'en présence d'un agent de couplage.

Les agents de couplage du métabolisme sont les enzymes (+ les ribozymes, de manière exceptionnelle).

2. Formation d'ATP et transphosphorylation

La phosphorylation de l'ADP en ATP peut être réalisée par couplage avec une réaction exergonique de déphosphorylation : on parle alors de transphosphorylation, ou de phosphorylation sur substrat.

C'est le mode de production de l'ATP dans le cytosol des cellules eucaryotes, en particulier par la glycolyse.

Il s'agit ici d'un **couplage chimio-chimique**.

3. Quelques notions de diversité des couplages...

Il existe une très grande variété de couplages énergétiques, en fonction des énergies potentielles impliquées :

- **Chimique** = de liaison (covalente) (chimio-)
- **Osmotique** = gradients de concentration (osmo-)
- **Electrique** = gradients électriques ($\rightarrow$ **électrochimique** car en réalité les différences de potentiel électrique sont dues à des gradients de concentrations d'ions : il y a alors « dans un même gradient » une composante électrique (différence de charges) et une composante osmotique (différence de concentrations)) (electro-)
- **Lumineuse** = lumière (photo-)
- **Mécanique** = mouvements (mécano-)

Les réactions **d'oxydoréduction** correspondent à un cas particulier de couplage chimique.

II. Organismes hétérotrophes : prélèvement dans le milieu

A. Autotrophie et approvisionnement en matière organique

Les organismes hétérotrophes doivent prélever de la matière organique dans le milieu. Dans le cas de la majorité des **Métazoaires**, ce prélèvement comprend plusieurs étapes :

- Ingestion de matière organique
- Digestion mécanique et enzymatique (obtention de petites molécules à partir des macromolécules ingérées)
- Absorption intestinale des petites molécules organiques

Les mycètes sont des organismes **absorbotrophes** : les petites molécules organiques sont prélevées dans le milieu grâce à un flux transmembranaire. C'est aussi le cas des bactéries et de certains eucaryotes unicellulaires.

D'autres eucaryotes unicellulaires, comme les paramécies, prélèvent la matière organique par phagocytose : on parle de **phagotrophie**.

B. L'entrée du glucose dans les cellules

Le glucose, afin de pouvoir être métabolisé dans les cellules, doit tout d'abords passer du milieu extracellulaire au cytosol.

Cette entrée du glucose dans la cellule est réalisée par une perméase au glucose, ou plus rarement par un cotransporteur. On peut noter qu'un grand nombre de composés organiques pénètrent dans les cellules grâce à des cotransporteurs.

L'entrée du glucose dans la cellule met ainsi en jeu, selon les situations :

- Une perméase de la famille GluT (flux passif)
- Un co-transporteur SGLuT (flux actif secondaire)

L'existence d'une diversité de GluT chez les Mammifères permet une diversité de contrôle des flux de glucose. Ainsi, la présence des transporteurs GluT4 à la membrane plasmique peut être régulée, au niveau des cellules musculaires, par des phénomènes d'endocytose et exocytose, ce qui permet une adaptation rapide des cellules en fonction de la condition physiologique de l'organisme. En particulier, la présence d'insuline lors d'une hyperglycémie induit une présence accrue de GluT4 à la membrane, et ainsi un flux entrant de glucose augmenté.

C. La distribution de la matière organique dans l'organisme pluricellulaire

Chez la plupart des Métazoaires, les nutriments absorbés au niveau du tube digestif sont distribués dans l'organisme par un fluide circulant.

Chez les Mammifères, il s'agit du sang, mis en mouvement par le cœur.

Chez les Insectes ou les Mollusques, il s'agit de l'hémolymphe.

III. Organismes autotrophes : réduction de matière minérale

On se place dans le cas des végétaux de la lignée verte (**Chlorophytes**). Ces organismes sont autotrophes au carbone et à l'azote, en étant capables de réduire le carbone minéral (CO_2) et l'azote minéral (NO_3^- , NO_2^-) en matière organique, réduite. Cette autotrophie est réalisée au sein des chloroplastes.

On se limite ici au cas de l'hétérotrophie au carbone.

A. Une réduction endergonique du carbone minéral : phase chimique de la photosynthèse

La phase chimique de la photosynthèse correspond à la réduction de la matière minérale en matière organique. Elle se déroule dans le stroma des chloroplastes.

1. Expérience de Calvin et Benson

Il s'agit d'une expérience sur des **chlorelles**, algues chlorophylliennes unicellulaires. Elles sont maintenues en suspension dans un récipient éclairé où barbote de l'air enrichi en CO_2 .

Une pompe permet de prélever un volume fixe de suspension, elles sont envoyées dans un système de tube. Le débit est contrôlé donc le temps passé dans le circuit l'est aussi.

A un point donné du circuit, on réalise une **injection de $^{14}\text{CO}_2$ radioactif**. On peut donc choisir le temps d'exposition au dioxyde de carbone radioactif.

En fin de parcours, les chlorelles sont tuées dans du méthanol bouillant.

Ensuite, on cherche à savoir dans quelles molécules a été intégré le carbone marqué. On extrait les molécules des chlorelles et on réalise une **radiochromatographie**. Comme toute chromatographie, il y a un support fixe et un éluant (solvant) mobile, qui entraîne

les molécules, ici selon leur solubilité. C'est une chromatographie en **2D** : une première migration dans une direction, puis une 2^{ème} migration à 90° de la 1^{ère}. Les molécules sont révélées grâce à la radioactivité du carbone.

Résultats :

- Durée d'exposition au CO₂ marqué : **1s** (non représenté). Un seul composé est apparu, c'est l'**APG** (3 Phospho glycérate, C3).
- Durée d'exposition : **5s**. On observe en plus : des **trioses phosphate** (C3), des **hexose** (C6), du **Ribulose 1,5 biP**
- Durée d'exposition : **5 min**. **D'autres** substances variées ont été synthétisées : des **acides aminés**, en particulier.

Interprétation : on obtient l'ordre de synthèse des molécules à partir de la fixation du CO₂. La fixation du CO₂ conduit à la formation du 3P glycérate (C3). Puis les trioses phosphates (C3) sont synthétisés et les hexoses (C6). Le ribulose 1,5biP est un pentose, quelle place a-t-il dans les synthèses ? Peut-être la régénération, permettant un fonctionnement cyclique.

2. Le cycle de Calvin-Benson

L'incorporation initiale du CO₂ dans le 3-phosphoglycérate est une réaction très exergonique ($\Delta G^0 = -51,9 \text{ kJ.mol}^{-1}$), catalysée par la **ribulose 1,5-biphosphate carboxylase/oxygénase** ou **Rubisco**.

Cette enzyme est localisée sur la face stromale des membranes des thylacoïdes des chloroplastes. C'est une enzyme à cinétique michaelienne très volumineuse = **500 000 daltons**

La Rubisco est constituée de

- 8 grosses sous-unités (**L**, 55kDa);
- 8 petites sous-unités (**S**, 13 kDa)

Chaque chaîne **L** contient un **site catalytique** et un **site régulateur** ; sous-unité synthétisée par le chloroplaste (génome chloroplastique). Les chaînes **S** augmentent l'activité catalytique ; sous-unité synthétisée dans le cytosol (génome nucléaire).

Cette enzyme est très abondante dans les chloroplastes où elle représente plus de 16 % des protéines totales. La rubisco est l'enzyme la plus abondante sur Terre et probablement la protéine la plus abondante de la biosphère. (C'est une enzyme "lente" : Vitesse de catalyse : **3 s⁻¹**). Cette faible vitesse d'action est compensée par la forte concentration de l'enzyme dans le stroma.

Le phosphoglycérate est ensuite phosphorylé au niveau de sa fonction acide carboxylique, puis réduit et déphosphorylé pour former du glycéraldéhyde-3-phosphate (et donc aussi son isomère, le DHAP).

Les réactions d'incorporation du CO₂ ne peuvent se poursuivre qu'en présence de RubiP. Cette régénération est assurée par un ensemble complexe de réactions, qui permettent la formation de trois RubiP à partir de cinq glycéraldéhyde-phosphate.

Il est ainsi possible de tirer un **bilan** en prenant en compte trois cycles de Calvin fonctionnant en parallèle :



En doublant les quantités, on obtient la formation de 2 trioses-phosphates, et donc potentiellement la formation d'un glucose.

Les triose-P produits par le cycle de Calvin peuvent être stockés transitoirement sous forme d'amidon, ou exportés vers le cytosol.

3. Bilan de matière et d'énergie

Les réactions du cycle de Calvin permettent la réduction du CO₂ (minéral) en carbone organique (trioses).

Cette réaction de réduction nécessite la présence de coenzymes réduits (NADPH, H⁺).

Ces réactions étant globalement endergoniques, elles nécessitent la réalisation d'un couplage énergétique avec la déphosphorylation de l'ATP.

La réalisation de l'autotrophie nécessite ainsi la présence de coenzymes :

- NADPH, H⁺ (CoE réduit)
- ATP (CoE énergétique)

B. La phase photochimique de la photosynthèse

1. Membrane du thylakoïde et chaîne photosynthétique : production de pouvoir réducteur

a. Une chaîne globalement endergonique

On trouve au niveau de la membrane des thylakoïdes des chloroplastes une chaîne d'oxydoréduction, réalisant un transfert d'électrons de l'eau H₂O au NADPH, H⁺.

Couple O₂ / H₂O : + 0,82 V
Couple NADP⁺ / NADPH, H⁺ : -0,32V $\Rightarrow$ Différence de potentiel rédox : -1,14V

La différence de potentiel rédox est **négative** : cette chaîne est donc globalement **endergonique**, et ne peut pas se réaliser sans apport énergétique extérieur. C'est la lumière qui fournit l'énergie nécessaire, grâce aux photosystèmes, constitués de protéines et surtout de pigments.

b. La captation de l'énergie lumineuse

Les **pigments** sont des molécules (ici lipidiques), capables d'absorber des photons lumineux, grâce à la présence de **doubles liaisons conjuguées**.

Les photons absorbés permettent l'**excitation des pigments**, c'est-à-dire le passage d'un électron sur une **orbitale supérieure**. Cet état est instable, et le retour à l'état initial (figure 14) se réalise au sein des photosystèmes soit par résonance (et ainsi transmission de l'excitation de proche en proche jusqu'à une chlorophylle a piège), soit au niveau de la chlorophylle a piège par **photochimie** → un électron est cédé à un accepteur et un nouveau est capté à partir d'un donneur.

La capture lumineuse est réalisée au niveau de deux **antennes collectrices**, dans lesquelles les pigments sont hautement organisés. Chaque antenne collectrice est associée à un **centre réactionnel**, l'ensemble formant un **photosystème**. Les deux photosystèmes diffèrent de par leurs propriétés d'excitation, et leur place dans la chaîne.

c. Le couplage photochimique et la chaîne photosynthétique

L'excitation de la chlorophylle la fait passer de **réducteur faible** à **réducteur fort**, ce qui se traduit par un saut de potentiel rédox : ce sont les sauts de potentiel des deux photosystèmes de la chaîne qui permettent la réalisation d'une chaîne globalement endergonique. On a ici un **couplage photo-chimique**.

Les parties de la chaîne photosynthétique, et en particulier celle située entre les deux PS, se déroulent selon les potentiels rédox croissants : elles sont ainsi exergoniques. Ainsi, un pompage endergonique de protons (du stroma vers le lumen) est réalisé au niveau du cytochrome b6f.

d. Bilan de la chaîne :

PS II : 4 photons → **O₂** + **4 H⁺** dans lumen

PQ → b/f : **8 H⁺** transloqués dans lumen

PSI → Fd → : **4 photons** : 2 NADP → **2 NADPH, H⁺**

Bilan : différentiel de 12 H⁺ transloqués dans le lumen et 2 NADPH, H⁺ produits

soit :

$$\begin{array}{c} 8 \text{ photons} \\ 2 \text{ NADP}^+ + 2 \text{ H}_2\text{O} \rightarrow \text{O}_2 + 2 \text{ NADPH} \\ 12 \text{ protons de gradient} \end{array}$$

Le couplage photochimique réalisé au niveau de la membrane du thylakoïde permet la production :

- De pouvoir réducteur, sous forme de NADPH, H⁺
- D'un gradient de proton, orienté du lumen vers le stroma

2. ATP synthase : production d'ATP

On observe une synthèse d'ATP au niveau des membranes thylakoïdienne. La digestion des complexes F1 montre que cette synthèse est réalisée au niveau de complexes enzymatiques FoF1, insérés dans ces membranes, et orientés vers le stroma.

L'**ATP synthase** est une protéine insérée dans la membrane interne des mitochondries ; c'est à son niveau que se réalise la synthèse d'ATP. Ce complexe multiprotéique est composé d'une partie fixe, le **stator**, et d'une partie mobile, le **rotor**.

Le **stator** est composé en particulier des sous-unités a, b et α, β. C'est au niveau des sous-unités **β** que la réaction ADP+Pi → ATP est catalysée.

Le **rotor** est composé en particulier des sous-unités **c** et **γ**. Nombre de sous-unités c variable selon les espèces et organites, de 8 à 14 : 12 dans le chloroplaste, 8-10 dans les mitochondries.

Les sous-unités a forment un **canal à proton**, qui permet le retour des H⁺ de l'espace intermembranaire vers la matrice, **selon le gradient électrochimique**. Le passage des H⁺ permet une **rotation du rotor** (par un mouvement de l'anneau de sous-unités c) : la rotation de la sous-unité γ induit un **changement de conformation des sous-unités β**.

Ces sous-unités peuvent passer successivement par trois conformations différentes :

- **L : Loose**. Conformation de moyenne affinité vis-à-vis de l'**ADP + Pi**. L'activité catalytique est faible
- **T : Tight**. Conformation de forte affinité. L'**activité catalytique** est forte.
- **O : Open**. Conformation de **faible affinité**.

ADP + Pi se fixent sur une sous unité L, La sous unité O est libre, l'ATP nouvellement formé est sur la sous unité T. Le flux de protons fait tourner la sous-unité γ , et provoque les changements de conformations :

L devient T : l'activité catalytique devient forte, $\text{ADP} + \text{Pi} \rightarrow \text{ATP}$

$\text{T} \rightarrow \text{O}$: l'affinité est faible, l'ATP est libéré.

$\text{O} \rightarrow \text{L}$: il est prêt à accueillir un nouveau couple de substrat ADP et Pi.

Et ainsi de suite...

Le bilan est donc de 3 ATP synthétisés pour 8-12 protons passant vers la matrice/stroma (selon nombre de sous-unités c).

En bilan, cela correspond donc :



C. Photosynthèse et photorespiration

Lorsque l'on observe la photosynthèse nette (dont en ayant éliminé l'effet de la respiration cellulaire) en fonction de la concentration en CO_2 , on s'aperçoit qu'à faibles concentrations, c'est souvent un dégagement de CO_2 qui se produit.

Il s'agit en fait de la **photorespiration**, qui consiste en une **consommation de O_2 et un dégagement de CO_2 en présence de lumière**. Malgré ce nom, il s'agit d'un phénomène lié aux processus photosynthétiques, et nullement à la respiration.

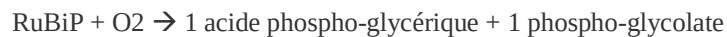
L'enzyme qui catalyse la fixation du CO_2 est la RUBISCO : cette enzyme a en réalité une **double activité catalytique**, acceptant le CO_2 comme le O_2 comme substrat. Il y a compétition entre les deux molécules au niveau du site actif : inhibition compétitive par le O_2 .

Remarque : Bien que constituée de plusieurs sous-unités, la cinétique de la Rubisco est michaelienne.

Activité **carboxylase** :



Activité **oxygénase** :



L'activité oxygénase est d'autant plus élevée que :

- La **teneur en CO_2 est faible** ;
- La **température est élevée** (vitesse carboxylase = 4 x celle de l'oxygénase, à 25°C) ;
- La **concentration en O_2 est élevée**.

Cette activité oxygénase produit du **phosphoglycolate** (C2) et le **3-phosphoglycérate** (C3). Le phosphoglycolate n'entre pas dans le cycle de Calvin, mais est métabolisé par une série de réactions faisant intervenir les **peroxysomes** et les **mitochondries**. Au final :

- $\frac{1}{4}$ du carbone est « perdu » sous forme de CO_2 ;
- $\frac{3}{4}$ du carbone se retrouve sous forme de glycéraldéhyde-3-phosphate, qui peut entrer dans le cycle de Calvin

La **photorespiration fait donc intervenir une coopération entre trois organites**. Cet ensemble de réactions **diminue le rendement de la photosynthèse, en particulier à des températures élevées**.

Pour information, les plantes de milieux chauds réalisent souvent une photosynthèse légèrement différente (dite photosynthèse en C4), qui permet d'éviter la photorespiration, et ainsi d'augmenter le rendement de la photosynthèse.

D. La chimiotrophie : une autotrophie sans utilisation d'énergie lumineuse

1. L'existence d'organismes chimiosynthétiques

L'étude de la photosynthèse montre donc que l'autotrophie est réalisée grâce à la formation de pouvoir réducteur (CoE réduits) et de CoE énergétiques, utilisés secondairement pour la réduction de la matière minérale en matière organique.

Dans le chloroplaste, cette production de coenzymes (processus endergonique) est couplée à la captation de l'énergie lumineuse.

Toutefois, on observe dans la nature des organismes autotrophes qui sont **indépendants** de l'énergie lumineuse : Ils réalisent leur autotrophie en absence de toute source lumineuse. On parle alors de **chimiosynthèse**, la réduction de la matière minérale étant réalisée à partir d'une énergie chimique et non d'une énergie lumineuse.

C'est le cas des **bactéries nitrifiantes**, comme *Nitrobacter*. Ces bactéries présentent des **invaginations** parfois très importantes de la membrane plasmique, en relation avec l'importance de ces chaînes rédox dans leur métabolisme.

2. Les chaînes de transfert d'électron chez Nitrobacter

Les bactéries du genre *Nitrobacter* sont des bactéries du sol. Elles sont capables de coupler l'oxydation des nitrites en nitrate avec la production d'ATP et de coenzymes réduits.

Elles utilisent pour cela une chaîne semblable à la chaîne respiratoire (*voir chapitre suivant*), mais en réalisant une « entrée en plein milieu » : l'oxydation du NO_2^- en NO_3^- est réalisé au niveau d'un complexe membranaire, et initie un flux électronique. Cette entrée se positionne « entre les complexes III et IV », du fait du potentiel rédox du couple nitrite/nitrate : $E_o' = +0,43 \text{ V}$

Ce flux peut prendre deux directions :

- Majoritairement vers le complexe IV : transfert de protons, permettant une synthèse d'ATP grâce à une ATP synthase orientée du périplasma vers le cytosol.
- Ce gradient de H^+ permet d'induire une « descente » des potentiels rédox vers les complexes III puis I et ainsi la synthèse de pouvoir réducteur NADH, H^+ .

3. L'autotrophie chez *Nitrobacter*

On observe ainsi une production d'ATP et de pouvoir réducteur, tout comme dans un chloroplaste.

Ces coenzymes sont ensuite utilisés dans le cadre d'un cycle métabolique similaire au cycle de Calvin. Ceci permet leur autotrophie au carbone.

E. Bilan : flux énergétiques et types trophiques

Les caractéristiques de chaînes d'oxydoréductions membranaires permettent de définir différents types trophiques.

Selon la nature de la **source d'énergie** utilisée pour permettre le **flux d'électrons** :

- Energie **chimique** (= molécules réduites qui sont oxydées) : **chimiotrophes**
- Energie **lumineuse** : **phototrophes**
-

Selon la nature du **donneur d'électrons** (et de protons) :

- **Minéral** (H_2O , NO_3^-) : **lithotrophe**
- **Organique** (NADH, H^+) : **organotrophe**

Ainsi :

- **Végétaux** = **photolithotrophes** | réalisation d'une photosynthèse
- ***Nitrobacter*** = **chimioolithotrophe** | réalisation d'une chimiosynthèse
- **Animaux** = **chimioorganotrophes** (*voir chapitre suivant*)

La notion de lithotrophie se superpose ici à celle d'autotrophie : en effet on observe dans ces cas là la formation de coenzymes réduits, qui sont ensuite utilisés (cycle de Calvin, chez les végétaux comme *Nitrobacter*) dans la synthèse de matière organique à partir de la réduction de matière minérale (CO_2).

De même, les organotrophes ne possédant pas cette propriété, ils sont hétérotrophes.

