



Lycée François-René de CHATEAUBRIAND
 136 BOULEVARD DE VITRÉ, CS 10637
 35706 RENNES CEDEX 7
CLASSE PRÉPARATOIRE BCPST 1C
 Biologie Chimie Physique Sciences de la Terre

ENSEIGNEMENT DE SCIENCES DE LA VIE ET DE LA TERRE (SVT)
 °° SCIENCES DE LA VIE °°
 >> Cours <<

Chapitre 9

Métabolisme 1

L'approvisionnement en matière organique

COURS COMPLET RÉDIGÉ

Objectifs : extraits du programme

SV-E Le métabolisme cellulaire (BCPST 1)	
<p>La présentation des différentes voies métaboliques est l'occasion de faire ressortir trois formes d'énergie privilégiées dans la cellule, à savoir l'énergie d'hydrolyse de l'ATP, l'énergie des réactions d'oxydo-réduction et l'énergie des différences de potentiels électrochimiques transmembranaires.</p> <p>Elle permet d'aborder deux modes de production d'ATP, par transphosphorylation ou par conversion énergétique d'une différence de potentiel électrochimique de protons au niveau des membranes.</p> <p>L'étude des chaînes de transport d'électrons associées à ces voies montre qu'elles reposent sur des réactions d'oxydo-réduction en chaîne, utilisent ou créent du pouvoir réducteur et génèrent un gradient électrochimique de protons (à l'origine de la synthèse d'ATP).</p> <p>Enfin, la mise en évidence de la diversité des sources de matière et d'énergie des cellules permet de distinguer différents types trophiques remobilisés par ailleurs dans le programme (en écologie et dans l'étude des cycles biogéochimiques et du fonctionnement des sols)</p>	
Savoirs visés	Capacités exigibles
<p>SV-E-1 L'approvisionnement en matière organique</p> <p>L'approvisionnement des cellules en matière organique se fait, soit par prélèvement direct dans l'environnement (hétérotrophes), soit par prélèvement puis réduction de matière minérale (autotrophes).</p> <p>Les cellules autotrophes synthétisent de la matière organique par réduction de matière minérale.</p> <p>Au cours du cycle de Calvin, le carbone du CO₂ est réduit en matière organique grâce aux produits de la phase photochimique.</p> <p>L'hydrolyse de l'ATP fournit l'énergie nécessaire au fonctionnement du cycle et la régénération du ribulose 1,5</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Construire un bilan de matière et d'énergie du cycle de Calvin - Schématiser l'organisation fonctionnelle de la chaîne photosynthétique. - Expliquer le modèle de la chaîne photosynthétique en utilisant les variations de potentiel d'oxydoréduction ($\Delta E'$) et d'enthalpie libre de réaction ($\Delta rG'$). - Relier le principe de la conversion d'énergie aux caractéristiques de l'ATP-synthase.

<p>bisphosphate (RuBP). La RubisCO est une enzyme clef permettant l'incorporation du CO₂.</p> <p>Dans le cas de la cellule végétale chlorophyllienne, l'énergie utilisée dans le cycle de Calvin provient de la conversion de l'énergie lumineuse (phototrophie). Les électrons nécessaires à la réduction proviennent d'une molécule minérale, l'eau (lithotrophie).</p> <p>La membrane des thylakoïdes contient des photosystèmes qui font partie d'une chaîne de transport d'électrons convertissant l'énergie lumineuse en énergie potentielle chimique.</p> <p>L'ATP est synthétisée par couplage osmochimique grâce à l'ATP synthase.</p> <p>La RubisCO est une enzyme oligomérique michaelienne à activité carboxylase (cycle de Calvin) et oxygénase (photorespiration).</p>	
<p>Précisions et limites :</p> <p><i>Seule l'autotrophie au carbone est à traiter. On se limite aux plastes des Chlorophytes.</i></p> <p><i>Le fonctionnement des translocateurs de protons de la chaîne photosynthétique n'est pas attendu. La liste des transporteurs d'électrons et la structure fine des photosystèmes ne sont pas exigibles. Les étapes détaillées de la photorespiration ne sont pas exigibles.</i></p> <p><i>La photosynthèse C4 est hors-programme.</i></p>	
<p>Dans le cas des bactéries nitrifiantes comme <i>Nitrobacter</i>, l'énergie est apportée par conversion d'énergie potentielle chimique (chimiotrophie). Les électrons nécessaires à la réduction proviennent d'une molécule minérale, l'ion nitrite (lithotrophie).</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Schématiser l'organisation fonctionnelle de la chaîne de transfert d'électrons d'une bactérie nitrifiante (<i>Nitrobacter</i>). - Expliquer le modèle de la chaîne de transfert des électrons chez les organismes chimioolithotrophes en utilisant les variations de potentiel d'oxydoréduction ($\Delta E'$) et d'enthalpie libre de réaction ($\Delta rG'$). - Comparer l'organisation fonctionnelle d'un thylakoïde et d'une membrane plasmique de bactérie nitrifiante.
<p>Les cellules hétérotrophes prélèvent directement la matière organique dans leur environnement.</p> <p>Ce prélèvement implique des échanges transmembranaires que ce soit au niveau des cellules constituant les surfaces d'échange avec le milieu ou au niveau des cellules consommatrices.</p> <p>Au sein d'un organisme pluricellulaire, un fluide circulant assure généralement le transport des molécules entre les différentes cellules.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Argumenter l'approvisionnement des cellules en matière organique en prenant l'exemple du glucose chez les Mammifères.
<p>Précisions et limites :</p> <p><i>On se limite à l'exemple d'un Mammifère. Aucune connaissance supplémentaire en dehors de celles abordées dans les cours sur les échanges membranaires et sur l'organisme animal n'est exigible.</i></p>	
<p>Liens :</p> <p>Métabolisme des organismes unicellulaires (SV-A-3) Fonction de nutrition vache/Fabacée (SV-A et SV-B-2) Échanges transmembranaires de l'entérocyte (SV-C-3) Protéines et interactions avec un ligand (SV-D-2-4) Flux de matière et d'énergie au sein des écosystèmes (SV-J-2) Types trophiques et cycle du carbone et de l'azote (BG-A)</p>	

Introduction générale au métabolisme

Comme toute cellule, **une cellule eucaryote échange de la matière et de l'énergie avec son environnement** : c'est donc un **système thermodynamique ouvert**. Les **systèmes vivants évoluent loin de l'équilibre thermodynamique** en ce sens où il n'y a **pas d'équilibre** avec l'environnement : il y a en permanence des **échanges de matière et d'énergie** avec cet environnement. Si la **quantité de matière** et l'**organisation d'un être vivant** sont globalement **stables au cours du temps**, c'est au prix d'un **rejet constant et massif d'énergie dans l'environnement** : les êtres vivants sont donc des **systèmes dissipatifs**. Le **maintien de l'ordre** dans les organismes s'opère au prix d'une **augmentation du désordre (l'entropie)** de l'environnement.

Revoir le **chapitre 0** introduisant à la biologie ou encore le **chapitre 1** consacré à la Vache

Il ne faut ainsi pas confondre stabilité, ordre et équilibre.

Les **organismes** sont globalement **stables** dans leur **constitution** (stabilité de la quantité d'eau, d'ions, de protéines... ce qui suppose un **équilibre entre entrées/synthèses et pertes/dégradations**) et leur **organisation** qui, paradoxalement, nécessite des **échanges permanents de matière et d'énergie** avec l'environnement (caractère « dynamique »). **Cette stabilité n'est permise que parce que les êtres vivants sont des systèmes dissipatifs évoluant loin de l'équilibre thermodynamique.**

Au sein des organismes, la **matière** subit en permanence de **nombreuses transformations chimiques** qui permettent, entre autres, le **maintien du haut degré d'organisation*** des **structures biologiques**. On appelle **métabolisme l'ensemble des réactions chimiques qui se déroulent dans une cellule (ou dans un organisme)**. Le métabolisme est classiquement divisé en deux grandes parties en réalité **interconnectées et interdépendantes** :

- Le **catabolisme** : **ensemble de réactions qui permettent la dégradation de molécules biologiques, permettant souvent la libération d'énergie**. Le plus souvent, la matière vivante est alors **oxydée** (encadré A).
- L'**anabolisme** : **ensemble de réactions qui permettent la synthèse de molécules organiques, consommant généralement de l'énergie**. Le plus souvent, la matière minérale ou vivante est alors **réduite** (encadré A).

* On appelle **turn-over moléculaire** le **renouvellement régulier des constituants moléculaires d'une cellule et/ou d'un être vivant**.

L'ensemble de ces réactions aurait une **vitesse extrêmement faible** et serait, dans les faits, « impossible » sans l'intervention de **protéines qui accélèrent (= catalysent) grandement les réactions chimiques** : les **enzymes**. On peut aussi citer les **ribosomes** qui **permettent la polymérisation des acides aminés en protéines**.

Le **fonctionnement enzymatique** est traité dans le **chapitre 11** (Les enzymes et la catalyse des réactions)

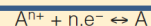
Le **fonctionnement ribosomique** est abordé dans le **chapitre 14** (L'expression du génome)

Encadré A Quelques rappels sur l'oxydoréduction

D'après SEGARRA et al. (2014), corrigé

Une réaction d'**oxydation** est une réaction de **perte d'électrons** éventuellement accompagnés de protons.

Une réaction de **réduction** est une réaction de **gain d'électrons** éventuellement accompagnés de protons



→ sens de la réduction

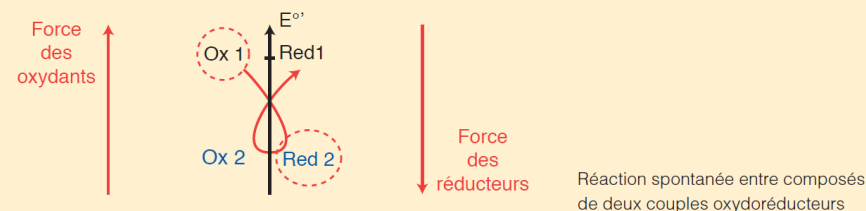
← sens de l'oxydation

Aⁿ⁺ : forme oxydée ; A : forme réduite ; n = nombre d'électrons transférés

Un **oxydant** est un composé qui **capte des électrons** et donc **oxyde un autre composé** (ce faisant l'oxydant est réduit lors de la réaction). Un **réducteur** est un composé qui **donne des électrons** et donc **réduit un autre composé** (ce faisant le réducteur est oxydé lors de la réaction).

Oxydant et réducteur forment des couples oxydoréducteurs caractérisés par un **potentiel oxydoréducteur** (ou potentiel redox), E, exprimé comme une **différence de potentiel** (unités : V) par rapport à un couple standard (H⁺/H₂). Des tables de potentiels redox standard dans les conditions d'usage biochimique (E⁰) permettent la comparaison des couples oxydoréducteurs.

Le transfert spontané des électrons entre deux couples oxydoréducteurs a lieu entre le réducteur le plus fort d'un couple (bas potentiel redox) et l'oxydant le plus faible (haut potentiel redox). Le transfert des électrons a donc lieu dans le **sens des potentiels redox croissants** (règle du gamma « γ »).



Introduction du chapitre

Ce premier **chapitre** de **métabolisme** a plusieurs **objectifs** :

- Présenter un panorama du **métabolisme** et de sa **structuration** ;
- Montrer la diversité des **origines** en **matière organique**, distinguant notamment l'**hétérotrophie** (= **situation métabolique où un organisme ne peut produire sa propre matière organique à partir de matière minérale et nécessite de la matière organique pré-existante d'origine environnementale**) et l'**autotrophie** (= **situation métabolique où un organisme produit sa propre matière organique à partir de matière minérale d'origine environnementale**) ;
- Expliciter les modalités métaboliques de la **photo-autotrophie** et de la **chimio-autotrophie** au travers des exemples respectifs des **Angiospermes** et de **Nitrobacter**.

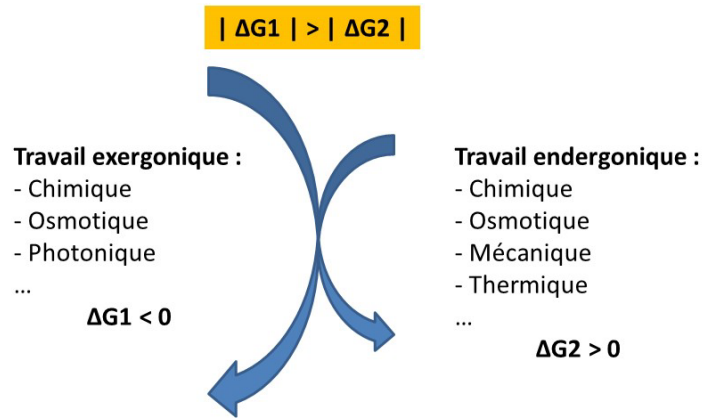
**Comment se structure le métabolisme énergétique des cellules ?
Quels mécanismes métaboliques et physiologiques assurent l'approvisionnement des cellules en matière organique ?**

I. Vue d'ensemble sur le fonctionnement énergétique et métabolique des cellules et l'origine de la matière organique

A. La diversité des formes d'énergie mises en jeu chez les êtres vivants

B. L'énergie de GIBBS et le caractère endergonique ou exergonique d'une réaction chimique

C. La nécessité de couplages énergétiques dans les cellules



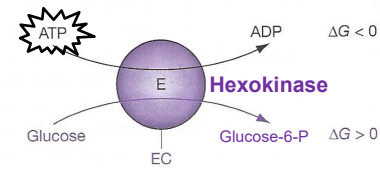
▲ FIGURE 2. Le principe d'un couplage énergétique. Original 2015.

▼ TABLEAU I. Quelques exemples de couplages énergétiques. D'après PERRIER, BEAUX *et al.* (2021)

Couplage	Transformation exergonique	Transformation endergonique	Conversion énergétique
Chimioosmotique <i>chaîne respiratoire</i>	Réaction chimique <i>oxydation coenzyme</i>	Transfert d'un soluté <i>transfert de H⁺</i>	Énergie chimique → gradient <i>pouvoir réducteur → gradient H⁺</i>
Osmochimique <i>ATP-synthase</i>	Transfert d'un soluté <i>transfert de H⁺</i>	Réaction chimique <i>synthèse d'ATP</i>	gradient → Énergie chimique <i>gradient H⁺ → ATP</i>
Photochimique <i>chaîne photosynthétique</i>	Absorption photon <i>excitation pigment</i>	Réaction chimique <i>réduction coenzyme</i>	Énergie lumineuse → Énergie chimique <i>photons → pouvoir réducteur</i>
Chimiochimique <i>transphosphorylation</i>	Réaction chimique <i>déphosphorylation</i>	Réaction chimique <i>synthèse d'ATP</i>	
Chimiomécanique <i>protéine motrice ATPasique (dynamine, kinésine)</i>	Réaction chimique <i>hydrolyse d'ATP</i>	Travail mécanique <i>déplacement</i>	Énergie chimique → Énergie mécanique <i>ATP → énergie cinétique</i>

Types de couplages énergétiques selon les transformations mises en jeu (en bleu : exemples).

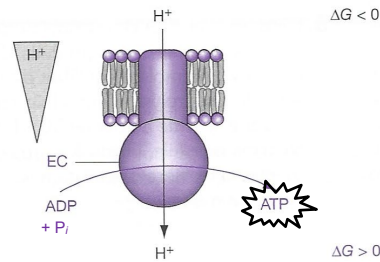
1 Couplage chimio-chimique



Couplage de deux réactions chimiques par une enzyme : (phosphorylation liée au substrat)

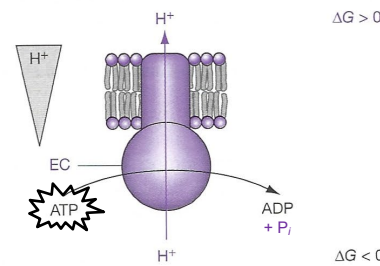
Cas fréquent de fonctionnement enzymatique

2 Couplage osmo-chimique



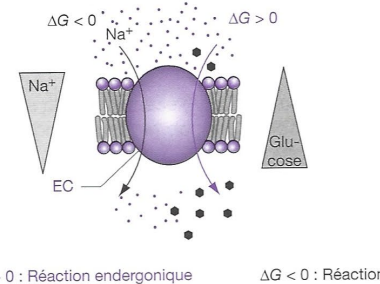
Couplage entre le flux de protons (réaction exergonique) et la synthèse d'ATP réaction endergonique (ATP synthase)

3 Couplage chimio-osmotique



Couplage d'une réaction chimique exergonique avec un transport de protons contre le gradient électrochimique (pompe protonique) (pompe Na⁺/K⁺ ATPase) (transport actif primaire)

4 Couplage osmo-osmotique



Couplage d'un transfert spontané d'un ion (réaction exergonique) avec un transport actif d'une molécule contre son gradient chimique (transport actif secondaire)

ΔG > 0 : Réaction endergonique ΔG < 0 : Réaction exergonique EC : Élément de couplage

▲ FIGURE 1. Quelques exemples de couplages énergétiques. D'après BREUIL (2007), corrigé.

D. L'origine environnementale – organique ou minérale – de l'énergie employée par les êtres vivants

1. L'environnement, un ensemble de ressources... pas forcément biodisponibles

2. Les grands types métaboliques (= types trophiques)

a. En fonction de la source d'énergie : phototrophes (source : lumière) vs. chimiotrophes (source : oxydation de matière)

b. En fonction de la source de carbone : autotrophes au carbone (source : CO₂) vs. hétérotrophes au carbone (source : matière organique pré-existante)

c. En fonction du donneur initial d'électrons : lithotrophes (donneur minéral) vs. organotrophes (donneur organique)

▼ TABLEAU II. **Les principaux types trophiques : deux visions.**
D'après BREUIL (2007) et SEGARRA, PIÈTRE *et al.* (2023)

Source d'énergie \ Source de matière	Minérale	Organique
Lumineuse	Photolithotrophes (végétaux et bactéries photosynthétiques)	Photo-organotrophes (quelques bactéries)
Chimique	Chimiolithotrophes (bactéries chimiosynthétiques)	Chimio-organotrophes (animaux, certaines bactéries, certains végétaux, mycètes)
	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> Autotrophes au carbone Hétérotrophes au carbone </div>	

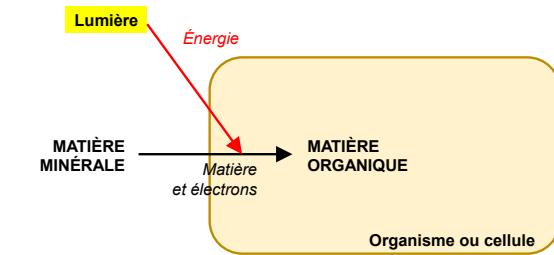
Source d'électrons	Molécule	Source d'énergie		Source de carbone
		Énergie lumineuse	Énergie chimique	
	Molécule minérale H ₂ O, H ₂ S, NH ₄ ⁺ , NO ₂ ⁻	Photo-lithotrophes Bactéries, algues, plantes	Chimio-lithotrophes Bactéries	Minérale Autotrophes
	Molécule organique Glucose...	Photo-organotrophes Bactéries, eucaryotes unicellulaires	Chimio-organotrophes Bactéries, champignons, animaux	Organique Hétérotrophes

Les photo-organotrophes ne seront pas abordés dans le chapitre.

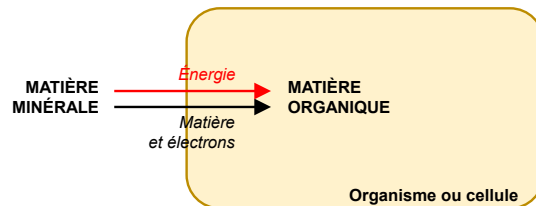
▼ TABLEAU III. **Diversité réelle des types trophiques.** D'après Wikipédia

Source d'énergie	Source d'électrons	Source de carbone	Type trophique	Exemples
Lumière Photo-	Composé organique -organo-	Organique -hétérotrophe	Photoorganohétérotrophe	Certaines bactéries
		Minérale (dioxyde de carbone) -autotrophe	Photoorganoautotrophe	Certaines bactéries (Althiorhodacées...), hémiparasites végétaux chlorophylliens (certaines Orchidées, Gui...)
	Inorganique -litho- ²	Organique -hétérotrophe	Photolithohétérotrophe	Certaines bactéries (<i>Thiobaca</i> ...)
		Minérale (dioxyde de carbone) -autotrophe	Photolithoautotrophe	Végétaux chlorophylliens, certaines bactéries (la plupart des Cyanobactéries, Thiorhodacées, Chlorobactéries...)
Oxydation d'un composé chimique organique ou minéral réduit Chimio-	Composé organique -organo-	Organique -hétérotrophe	Chimioorganohétérotrophe	Animaux, Mycètes (champignons), végétaux non chlorophylliens (parasites comme l'Orobanche), la plupart des bactéries (dénitrifiantes...)
		Minérale (dioxyde de carbone) -autotrophe	Chimioorganoautotrophe	Rare, certains Dinoflagellés (mixotrophie)
	Inorganique -litho- ²	Organique -hétérotrophe	Chimiolithohétérotrophe	Certaines bactéries (<i>Bosea</i> , <i>Albibacter</i> ...)
		Minérale (dioxyde de carbone, méthane) -autotrophe	Chimiolithoautotrophe	Certaines bactéries dites chimiosynthétiques, terrestres (nitrifiantes, méthanogènes...), ou marines (écosystèmes hydrothermaux). La source d'énergie est inorganique.

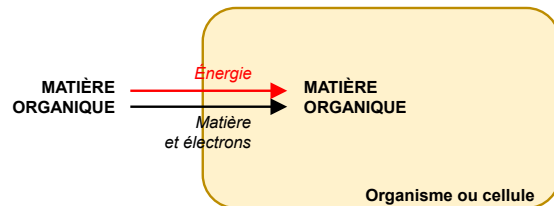
Cette diversité métabolique sera illustrée chez les unicellulaires en BCPST2.



La photo-(litho)-autotrophie
('plantes', 'algues', Cyanobactéries...) → II

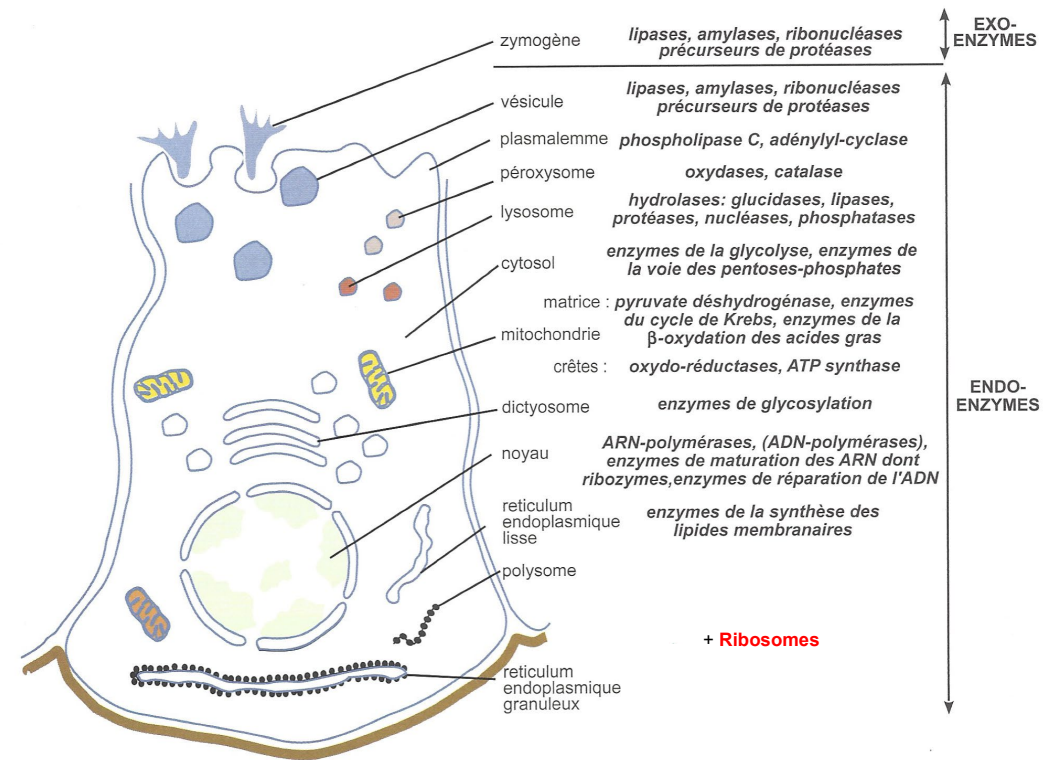


La chimo-(litho)-autotrophie (archées, Bactéries...) → III



La chimo-(organo)-hétérotrophie
(Animaux, 'champignons', Bactéries, archées, unicellulaires eucaryotes...) → IV

▲ FIGURE 3. **Types trophiques traités dans ce cours.** Original 2023.



Répartition des principales enzymes dans une cellule animale de type exocrine.

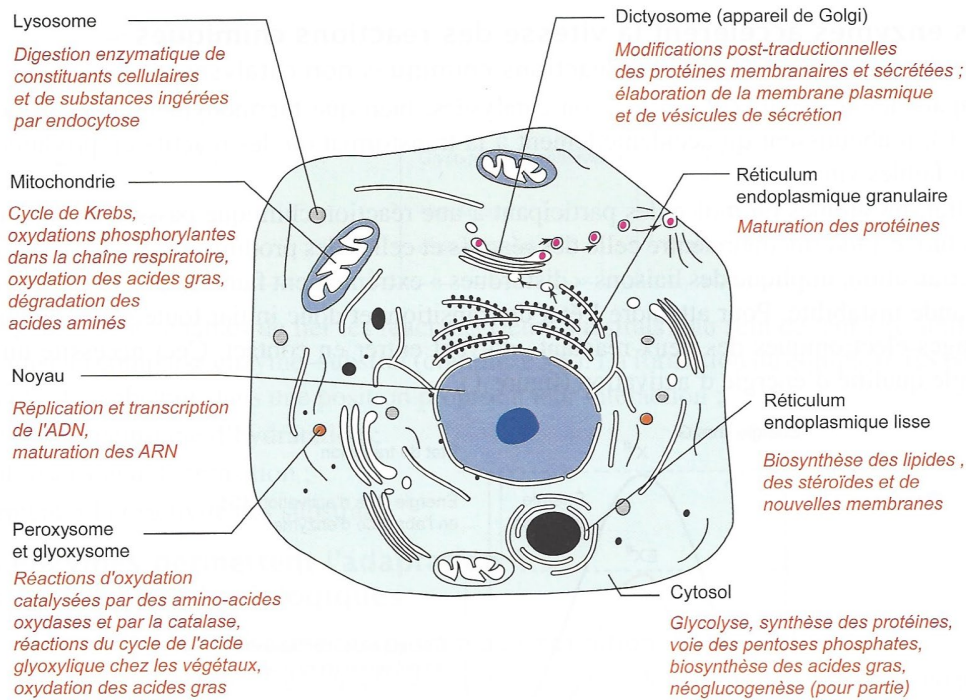
▲ FIGURE 4. **Les enzymes de la cellule acineuse pancréatique [pour illustration].**
Il convient de ne pas oublier les **ribosomes situés dans le cytosol** (même si ce ne sont pas des enzymes mais des complexes ribonucléoprotéiques).
D'après PEYCRU et al. (2013)

E. Le rôle central des enzymes dans la réalisation et le contrôle des réactions chimiques du vivant

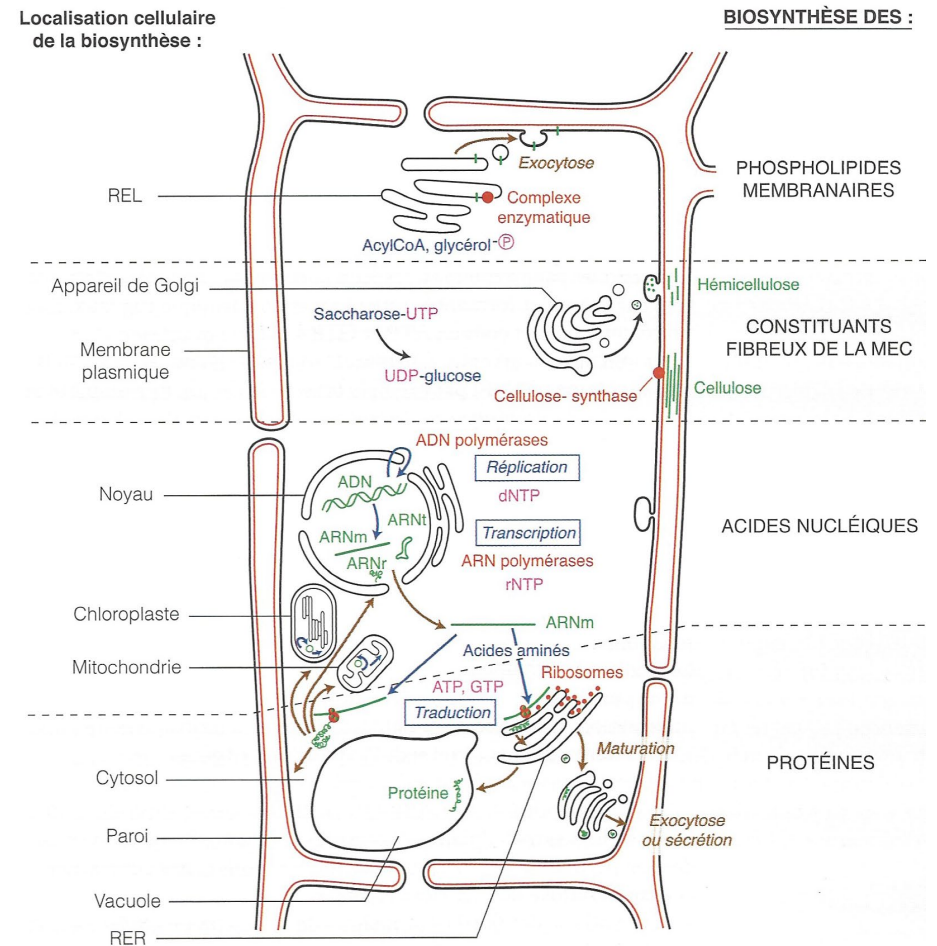
F. L'importance métabolique de la compartimentation cellulaire

1. La compartimentation, une caractéristique permettant la séparation des milieux réactionnels et ainsi la spécialisation métabolique des volumes cellulaires

2. Panorama des principales réactions de catabolisme et d'anabolisme dans les cellules eucaryotes



▲ FIGURE 5. **Compartimentation cellulaire et répartition des voies métaboliques : un panorama dans le cas d'une cellule animale [pour illustration].** D'après RICHARD et al. (2015)



En rouge : les principales enzymes impliquées dans la biosynthèse ; en rose : le coût énergétique ; flèches brunes : acheminement des molécules vers leur localisation fonctionnelle ; flèches bleues : réplication, transcription et traduction.

RER : réticulum endoplasmique rugueux ; REL : réticulum endoplasmique lisse.

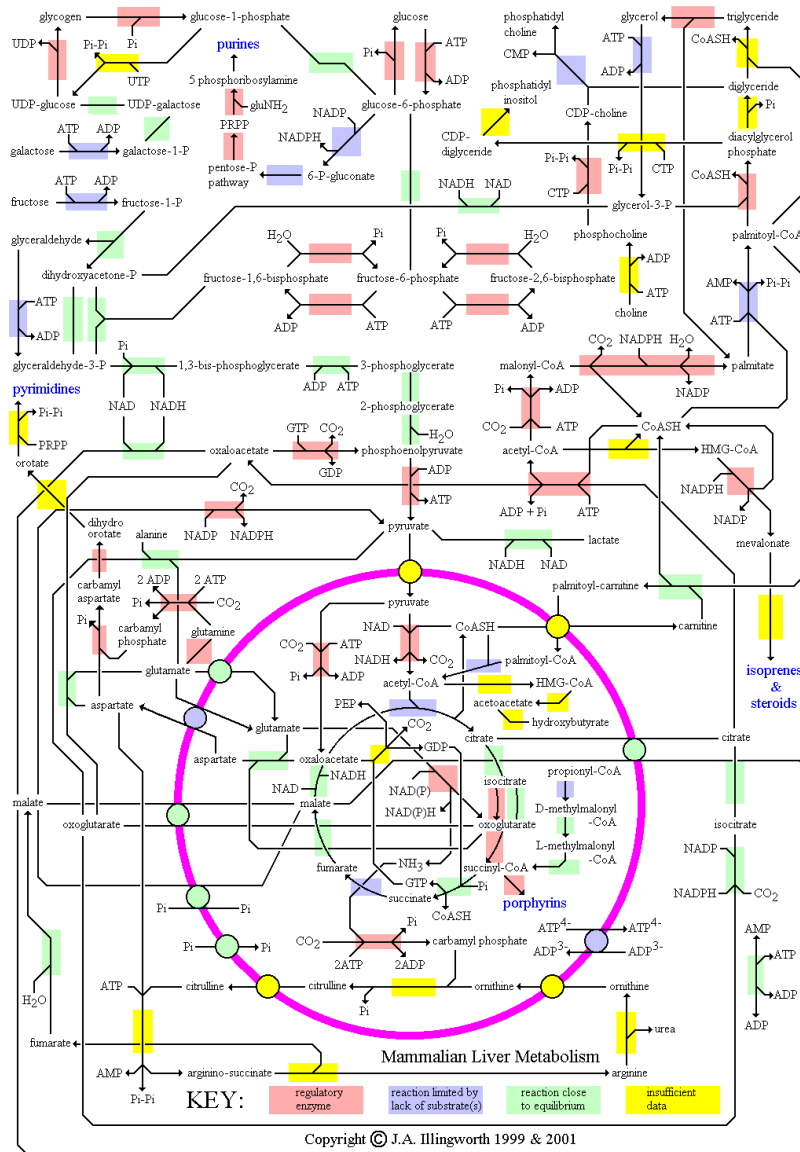
dNTP : désoxyribonucléotides tri-phosphate.

rNTP : ribonucléotides tri-phosphate.

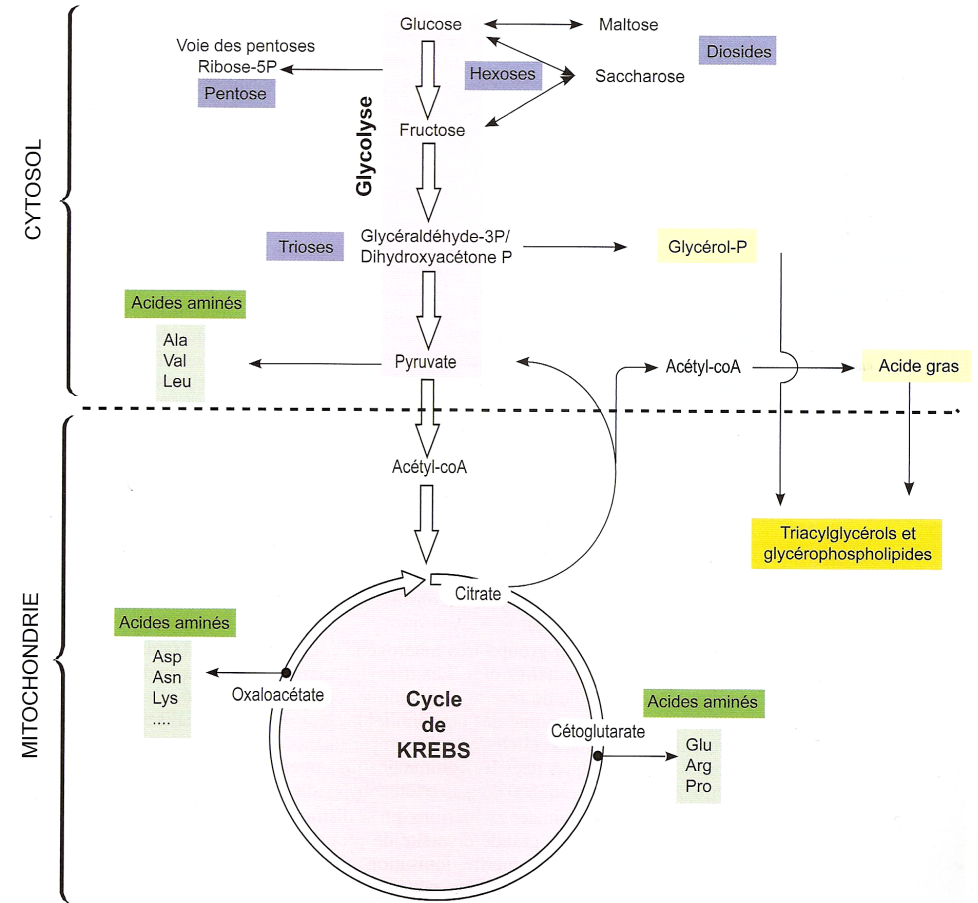
▲ FIGURE 6. **Localisation de quelques réactions de synthèse dans une cellule végétale [pour illustration].** D'après SEGARRA et al. (2014)

Notez que les synthèses glucidiques (et notamment le rôle de la photosynthèse) ne sont pas représentées.

3. Un métabolisme en « réseau » (notion de carte métabolique) où les voies sont interconnectées

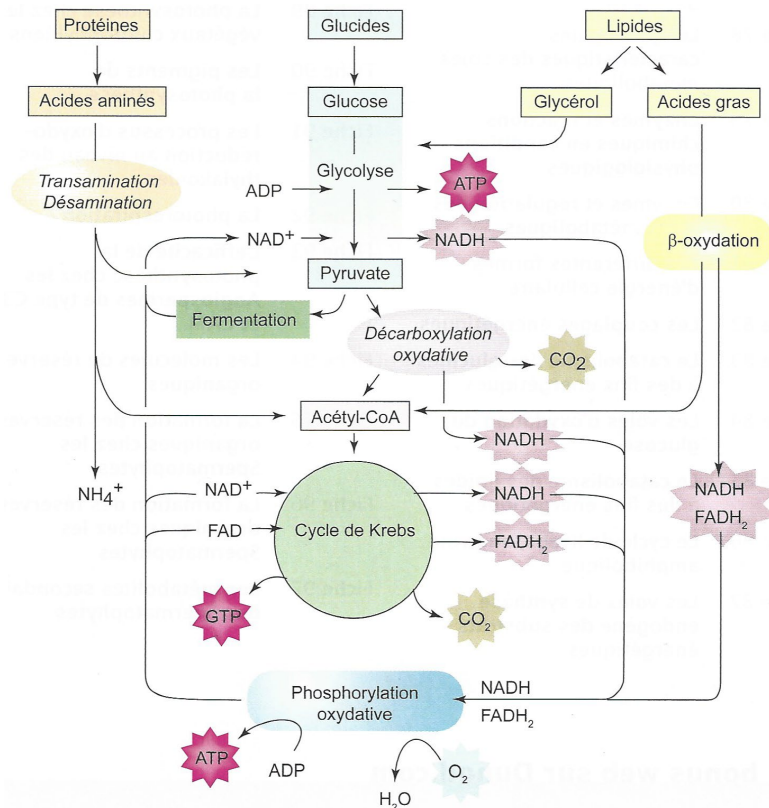


▲ FIGURE 7. Un exemple de carte métabolique simplifiée (hépatocyte) [pour illustration]. <http://www.bmb.leeds.ac.uk/teaching/icu3/metabol/index.htm> (consultation septembre 2017)



▲ FIGURE 8. Exemples de parentés biochimiques existant entre petites molécules organiques [pour information]. D'après CAMPBELL *et al.* (2012).

4. La présence de molécules carrefours, des points de convergence de plusieurs voies métaboliques (exemples du pyruvate et de l'acétyl-CoA)



▲ FIGURE 9. Panorama du catabolisme des cellules eucaryotes. D'après RICHARD *et al.* (2015)

G. Les trois principales formes d'énergie directement utilisables dans les activités cellulaires

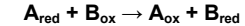
1. L'emploi de pouvoir réducteur (énergie chimique) : réactions d'oxydoréduction et importance des coenzymes d'oxydoréduction

Encadré B La notion de potentiel redox et son importance biochimique

D'après PEYCRU *et al.* (2013)

Notion de potentiel redox E°

Soit une réaction d'oxydoréduction bilan :



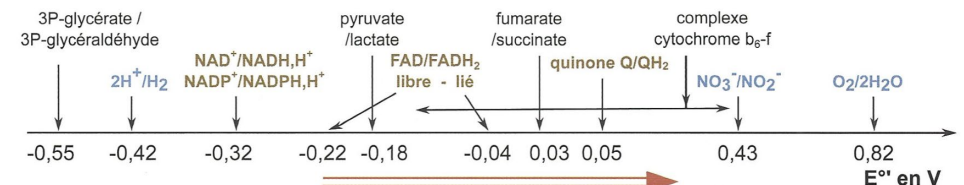
Pour chaque couple redox ($A_{\text{ox}}/A_{\text{red}}$ ou $B_{\text{ox}}/B_{\text{red}}$), il est possible de caractériser son affinité vis-à-vis des électrons par un potentiel redox d'électrode standard E° , défini par rapport au potentiel redox d'une électrode à hydrogène de référence ($2H^+/H_2$) égal à 0. On utilise toutefois en biologie une valeur dérivée de E° , notée $E^{\circ\prime}$ car mesurée à pH 7 (dans ce cas $E^{\circ\prime}[2H^+/H_2] = -0,42 \text{ V}$).

Différence de potentiel redox $\Delta E^{\circ\prime}$ et critère de spontanéité

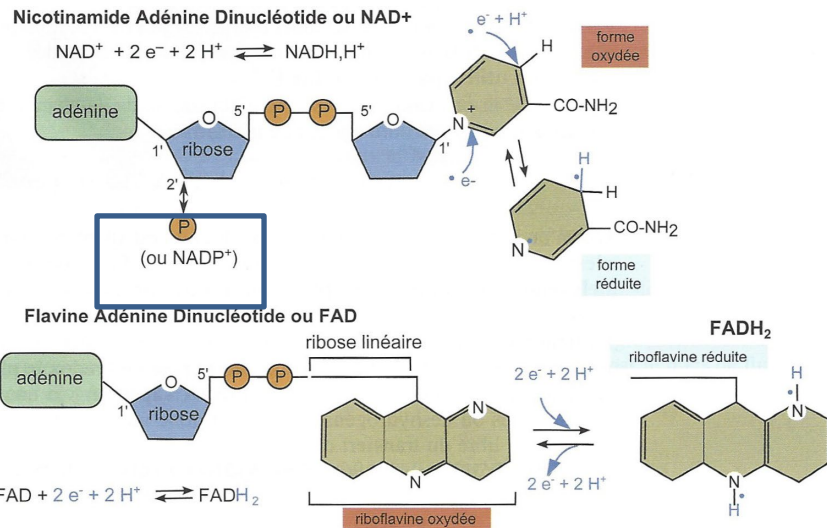
une réaction d'oxydoréduction est spontanée ou exergonique lorsque $\Delta E^{\circ\prime} > 0$ c'est-à-dire $E^{\circ\prime}_B > E^{\circ\prime}_A$. Le transfert d'électrons se fait spontanément dans le sens des potentiels redox croissants, du couple le plus réducteur (potentiel redox le plus faible) au couple le plus oxydant (potentiel redox le plus élevé). Tout transfert inverse nécessite un apport d'énergie.

Quelques valeurs de $E^{\circ\prime}$ rencontrés en biologie

La figure consigne la valeur du potentiel redox standard $E^{\circ\prime}$ de quelques couples couramment rencontrés en biologie. Les couples au potentiel redox le plus faible sont aptes à réduire spontanément les couples de potentiel redox supérieur via une catalyse enzymatique (oxydoréductases ou déshydrogénases). Ils ont donc un fort pouvoir réducteur.



Échelle des valeurs du potentiel redox standard $E^{\circ\prime}$ de quelques couples (les coenzymes sont représentés en marron).

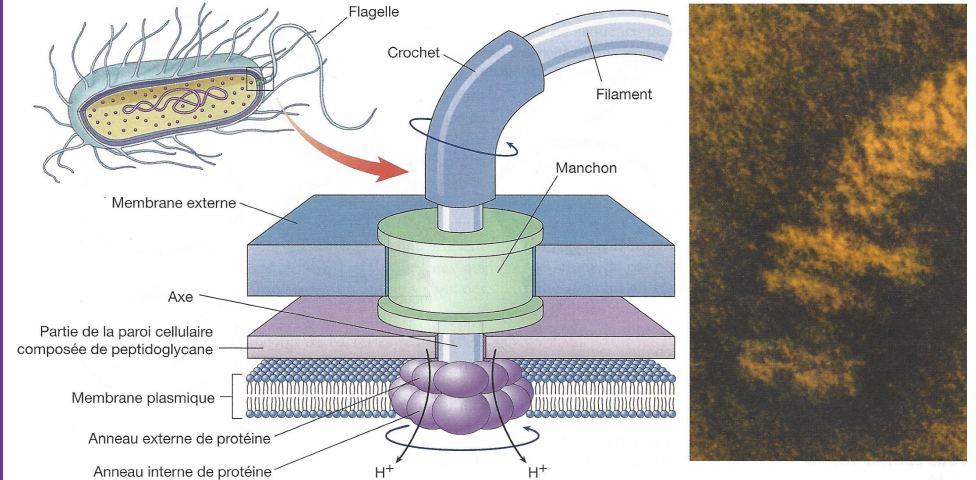


▲ FIGURE 10. Trois coenzymes d'oxydoréduction [pour information ?].
D'après PEYCRU *et al.* (2013)

2. L'utilisation de gradients chimiques ou électrochimiques membranaires (énergie osmotique)
3. L'utilisation de nucléosides triphosphates, notamment l'ATP (énergie chimique)

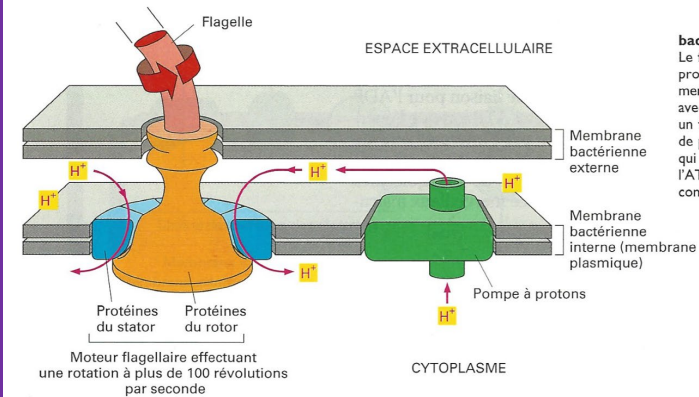
Encadré C La flagelle bactérien et sa mise en mouvement

➤ Le flagelle des Bactéries est entièrement protéique (composé sur sa longueur d'un filament de flagelline, et de complexes protéiques plus complexes à sa base) et mû par la force proton-motrice. **Ne le confondez pas** avec le flagelle (ou le cil) eucaryote qui est une expansion cytoplasmique avec une armature cytosquelettique (axonème) en son sein. En outre, le mouvement du flagelle eucaryote est ATP-dépendant, dû à la mobilité de moteurs moléculaires sur le cytosquelette.



Moteur flagellaire d'une bactérie gram-négative. Un filament protéique, composé de flagelline, est attaché à un axe protéique qui traverse un manchon dans la membrane externe et un orifice dans l'assise de peptidoglycane jusqu'à des anneaux protéiques fixés à la paroi cellulaire et à la membrane plasmique, comme des anneaux de roulements à billes. L'axe tourne quand l'anneau protéique interne attaché à l'axe se déplace par rapport à l'anneau externe fixé à la paroi cellulaire. L'anneau interne est un canal ionique H⁺, une pompe à protons qui se sert du passage des protons dans la cellule pour alimenter le mouvement de l'anneau interne par rapport à l'externe.

D'après RAVEN *et al.* (2007a)



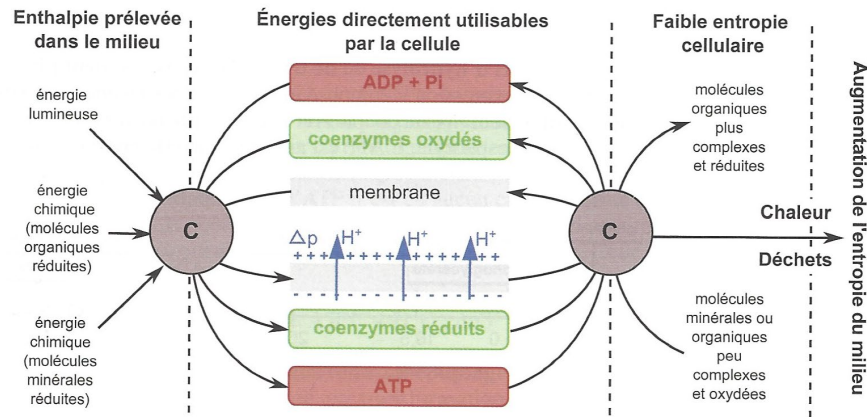
Rotation du flagelle bactérien actionnée par le flux de H⁺. Le flagelle est fixé sur une série d'anneaux protéiques (orange), qui sont inclus dans les membranes externe et interne et tournent avec le flagelle. La rotation est actionnée par un flux de protons à travers un anneau externe de protéines (le stator) selon des mécanismes qui pourraient ressembler à ceux utilisés par l'ATP synthase, même s'ils ne sont pas encore compris.

D'après ALBERTS *et al.* (2004)

4. Proposition de bilan

- Voir figure 11.

En définitive, les multiples réactions de l'anabolisme et du catabolisme ne consomment et ne libèrent que de faibles quantités d'énergie (de l'ordre de quelques dizaines de $\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$) ce qui est un moyen de minimiser les pertes d'énergie sous forme de chaleur (l'inverse serait peu compatible avec les structures biologiques très sensibles à l'échauffement). Le potentiel d'hydrolyse de l'ATP correspond parfaitement à ces besoins. De plus le fractionnement du métabolisme en réactions élémentaires offre, outre un meilleur usage de l'énergie disponible, la possibilité de contrôler un plus grand nombre d'étapes et d'ajuster au mieux offre et demande à l'échelle cellulaire. Enfin la monnaie unique qu'est l'ATP (et ses analogues CTP, GTP ou UTP) pour de nombreux travaux cellulaires limite le nombre d'enzymes impliquées. C'est une économie d'investissement pour la cellule.



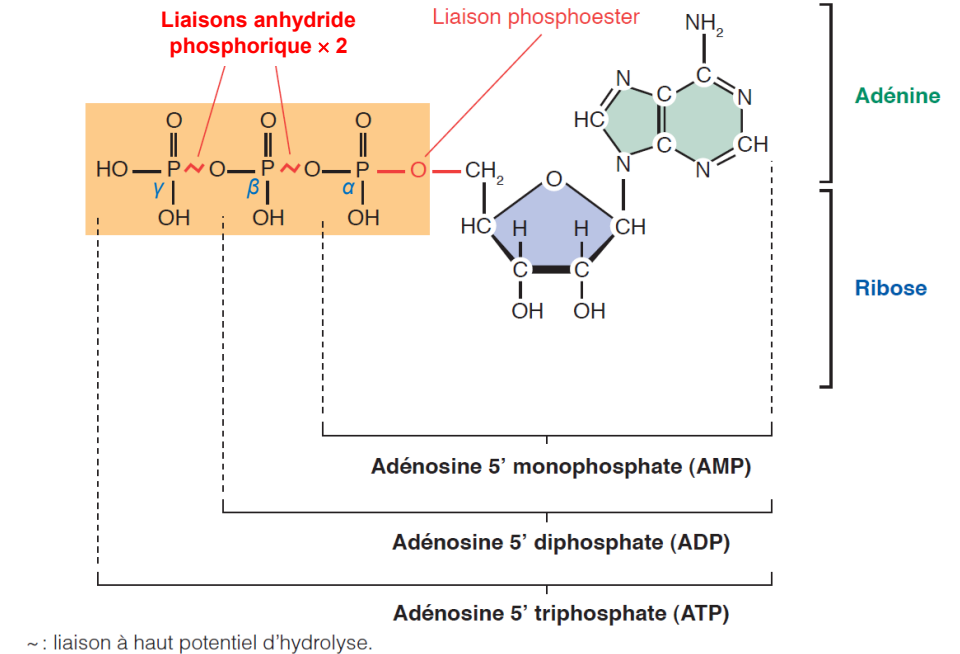
Transferts d'énergie au cours du métabolisme et position centrale des trois formes d'énergie utilisable par la cellule (C : couplages divers).

▲ FIGURE 11. **Les principales sources d'énergie dans la cellule : une vision d'ensemble.** D'après PEYCRU *et al.* (2013)

H. Un positionnement métabolique central de l'ATP

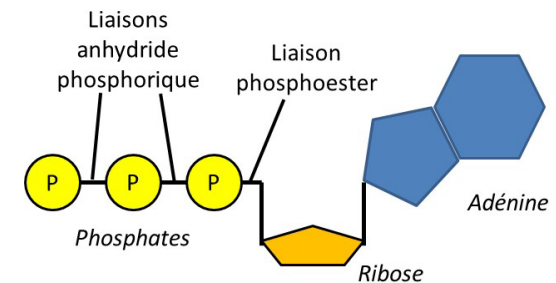
1. L'ATP, molécule dont l'hydrolyse est fortement exergonique

a. Un nucléoside triphosphate



~ : liaison à haut potentiel d'hydrolyse.

▲ FIGURE 12. **L'ATP (adénosine triphosphate).** D'après SEGARRA *et al.* (2014), modifié.



▲ FIGURE 13. **L'ATP (adénosine triphosphate) : proposition de schéma simplifié.**

b. Une molécule à haut potentiel d'hydrolyse des liaisons anhydride phosphorique, libérant plus de 30 kJ · mol⁻¹ en conditions standard

c. Un potentiel d'hydrolyse néanmoins intermédiaire parmi les molécules de transfert de groupement phosphate

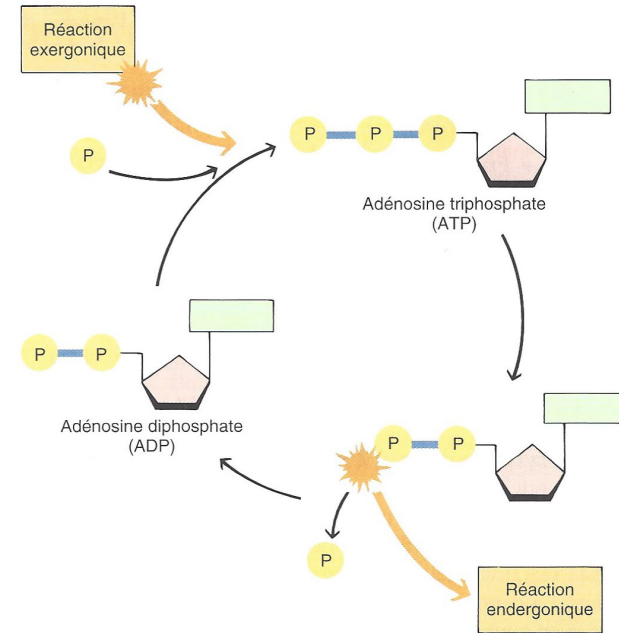
▼ **TABLEAU IV. Valeurs de potentiels d'hydrolyse de substances phosphorylées.**
Notez la position intermédiaire de l'ATP.
 D'après SEGARRA *et al.* (2014).

Composés	$\Delta rG^{0'}$ en kJ.mol ⁻¹	Type de liaison	Potentiel de transfert	Sens de transfert spontané
PEP (phosphoénolpyruvate)	-61,9	Liaisons à haut potentiel d'hydrolyse	Élevé	↓
1, 3-Bisphosphoglycérate	-49,4			
Phosphocréatine	-43,1			
ATP → AMP + PPi	-32,2			
ATP → ADP + Pi	-30,5			
Glucose 1-phosphate	-20,9	Liaisons à faible potentiel d'hydrolyse	Faible	
Fructose 6-phosphate	-13,8			
Glucose 6-phosphate	-13,8			

▼ **TABLEAU V. Deux exemples de couplages impliquant le couple ATP/ADP.**
Rappel : un bilan est toujours exergonique.
 D'après SEGARRA *et al.* (2014).

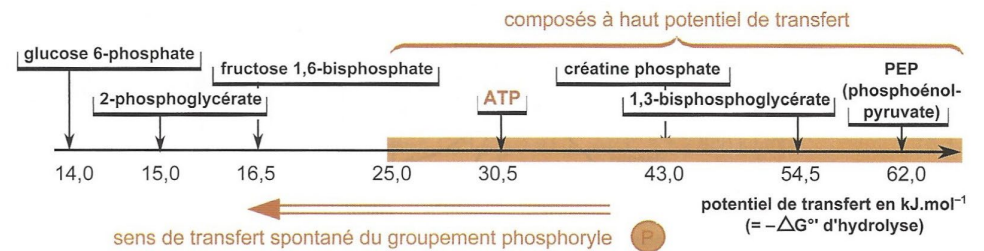
	Enzyme	Réactions dans la glycolyse	$\Delta rG^{0'}$ kJ.mol ⁻¹	
½ Réaction		PEP + H ₂ O → Pyruvate + Pi	-61,9	Exergonique
½ Réaction		ADP + Pi → ATP + H ₂ O	+30,5	Endergonique
Réaction globale	Pyruvate kinase	PEP + ADP → ATP + Pyruvate	-31,4	Exergonique
½ Réaction		ATP + H ₂ O → ADP + Pi	-30,5	Exergonique
½ Réaction		Glucose + Pi → Glucose-6-P + H ₂ O	+13,8	Endergonique
Réaction globale	Hexokinase	ATP + Glucose → Glucose-6-P + ADP	-16,7	Exergonique

Le $\Delta rG^{0'}$ de chaque réaction globale correspond à la somme des variations d'enthalpie libre des réactions partielles.



Réactions endergoniques et exergoniques Dans les systèmes vivants, les réactions endergoniques, telles que les réactions de biosynthèse, sont alimentées par l'énergie libérée dans les réactions exergoniques auxquelles elles sont couplées. Dans la plupart des réactions couplées, l'ATP est l'intermédiaire qui transporte l'énergie d'une réaction à l'autre.

L'ATP, un intermédiaire énergétique



Échelle des potentiels de transfert du groupement phosphorylé de quelques composés et position centrale de l'ATP.

L'ATP, une molécule à potentiel d'hydrolyse intermédiaire au sein des molécules biologiques

▲ **FIGURE 14. L'ATP, une monnaie énergétique.**
 D'après PEYCRU *et al.* (2013) et RAVEN *et al.* (2007b)

2. L'ATP, molécule régénérable par divers processus

a. Trois modalités de régénération

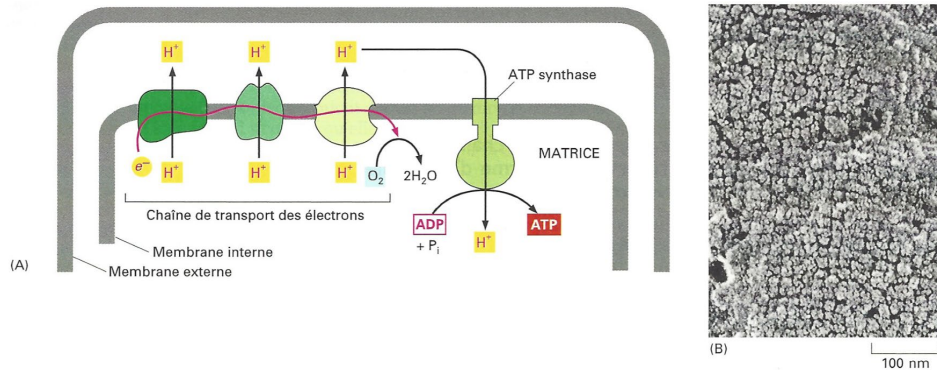


Figure Mécanisme général de la phosphorylation oxydative.

(A) Lorsqu'un électron riche en énergie passe le long de la chaîne de transport des électrons, une partie de l'énergie libérée est utilisée pour actionner les trois complexes enzymatiques respiratoires qui pompent H^+ pour les sortir de la matrice. Le gradient électrochimique de protons à travers la membrane interne entraîne les H^+ et les ramène à travers l'ATP synthase, un complexe protéique transmembranaire qui utilise l'énergie du flux de H^+ pour synthétiser, dans la matrice, l'ATP à partir de l'ADP et du P_i . (B) Photographie en microscopie électronique de la surface interne de la membrane mitochondriale d'une cellule végétale. Des particules très rapprochées sont visibles, dues aux portions saillantes de l'ATP synthase et des complexes enzymatiques respiratoires. (Microphotographie due à l'obligeance de Brian Wells.)

▲ FIGURE 15. Phosphorylation oxydative. D'après ALBERTS *et al.* (2004)

α. La phosphorylation oxydative, un couplage globalement chimiochimique permis par la chaîne respiratoire et l'ATP synthase

β. La photophosphorylation, un couplage globalement photochimique permis par la chaîne photosynthétique et l'ATP synthase

γ. La phosphorylation au niveau du substrat (= transphosphorylation), un couplage chimiochimique où le phosphate est transféré d'une molécule phosphorylée vers l'ADP



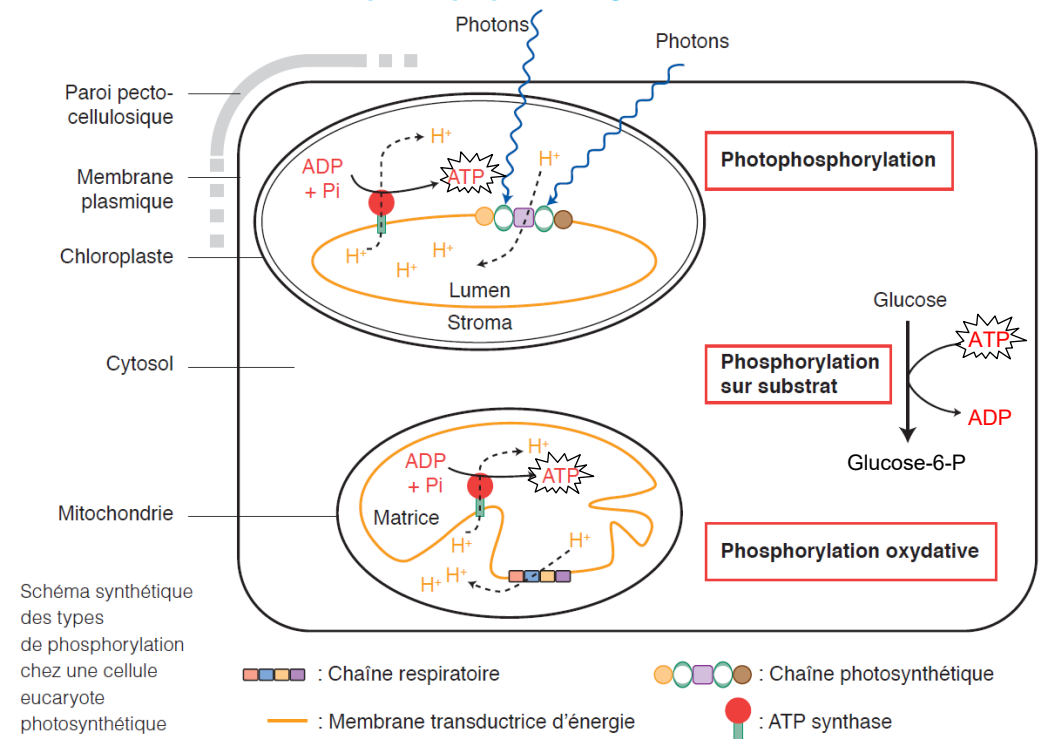
La production d'ATP par couplage chimio-chimique

A - B : Dans la glycolyse, l'énergie libérée lors de la rupture de liaisons riches en énergie formées pendant la phase préparatoire est utilisée pour la synthèse d'ATP lors de la phase de remboursement ; C : Dans les cellules musculaires, où le turn-over de la molécule d'ATP est particulièrement élevé, la phosphocréatine constitue une réserve d'énergie. Molécule à très haut potentiel d'hydrolyse elle permet d'assurer la synthèse d'ATP lorsque la quantité d'ATP diminue, selon une réaction catalysée par la créatine kinase. L'action de la créatine kinase combinée à celle de la myokinase fait que la concentration d'ATP dans les cellules musculaires ne diminue que de 10 % lors du passage d'un état de repos à un état de forte activité.

▲ FIGURE 16. Production d'ATP par phosphorylation d'ADP au niveau du substrat. D'après RICHARD *et al.* (2015)

5. Bilan

b. Les voies métaboliques impliquant la régénération d'ATP



▲ FIGURE 17. Modalités de phosphorylation d'ADP en ATP dans une cellule eucaryote. D'après SEGARRA *et al.* (2014), adapté.

c. Le rôle central des ATP synthases (= sphères pédonculées)

α. Un complexe enzymatique très répandu dans le monde vivant et comprenant de multiples sous-unités

L'analyse chimique et l'étude de diagrammes de diffraction des rayons X par des cristaux de ce complexe purifié permettent d'établir son architecture moléculaire (tableau et figure). Deux grandes régions constituent cet édifice. La région F_0 forme la partie membranaire ou base hydrophobe alors que la partie F_1 est située dans la matrice (ou le cytosol chez les bactéries). Chacune d'elles comporte diverses protéines. L'analyse dynamique permet de regrouper les sous-unités en deux parties, l'une fixe, le **stator**, l'autre mobile, le **rotor**.

TABLEAU DIVERSES SOUS-UNITÉS DE L'ATP SYNTHASE BACTÉRIENNE.

Régions	Sous-unités et stoechiométrie*	Fonctions
F_0	a_3 b_2 c_{12}	a : demi-canal à protons b : colonne de maintien du stator ? c : base du rotor ; disposition en anneau
F_1	α_3 β_3 γ δ ϵ	$\alpha_3 \beta_3$: stator matriciel β_3 : partie catalytique du stator γ : une partie de l'axe du rotor δ : maintien de la partie matricielle avec b ? ϵ : autre partie du rotor
Stator	$a_3, b_2, \delta, \alpha, \beta_3$	base du moteur
Rotor	c_{12}, γ, ϵ	partie rotative qui est responsable des changements de conformation de β

* La stoechiométrie est variable selon l'origine du complexe.

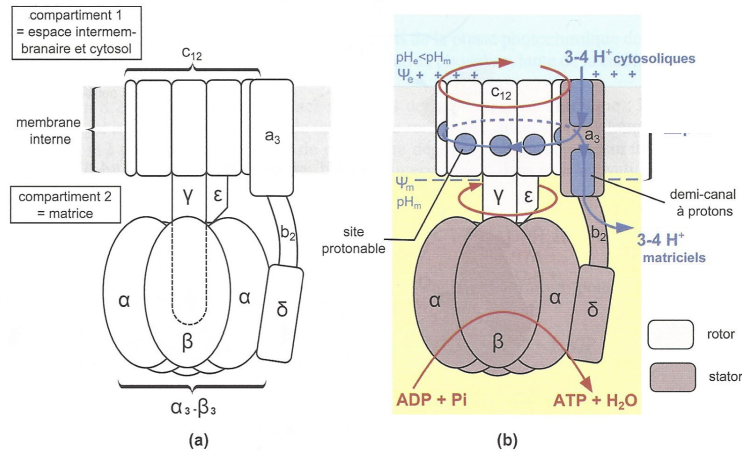
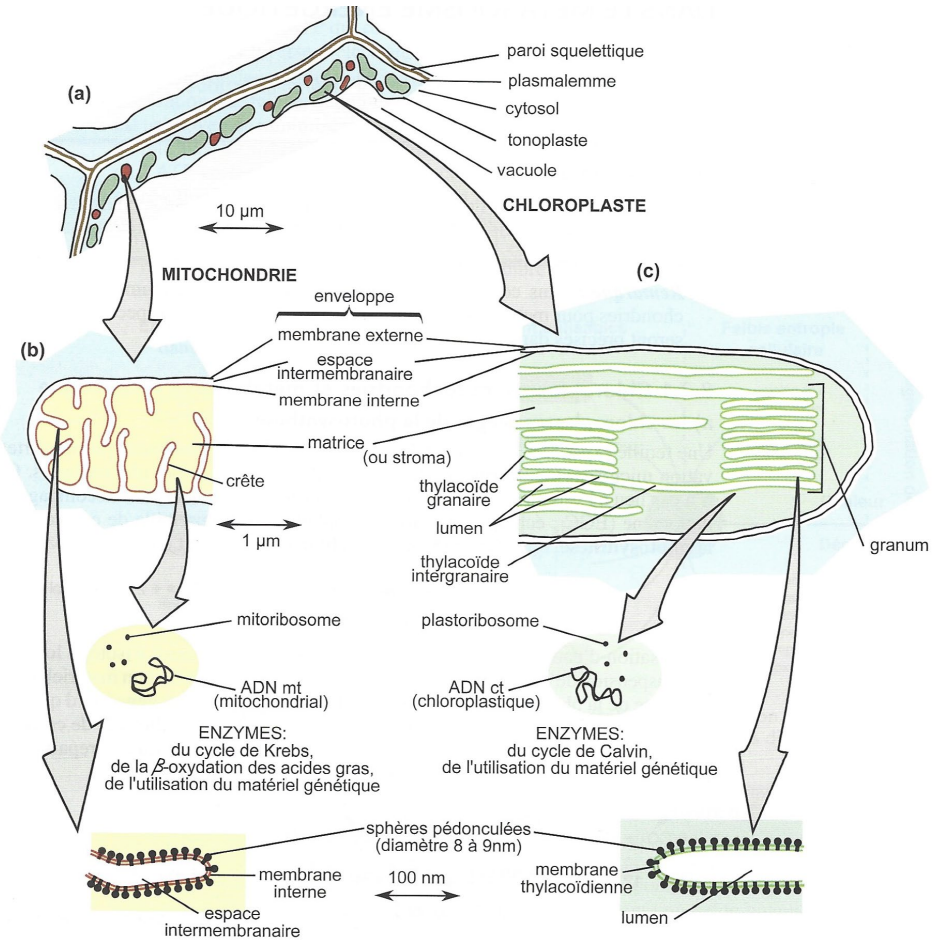


FIGURE Architecture moléculaire de l'ATP synthase (a) et principe de fonctionnement (b).

Dans les mitochondries et les chloroplastes, l'ATP synthase catalyse la phosphorylation de l'ADP en utilisant l'énergie dissipée par la diffusion de protons. Dans le plasmalemme bactérien, elle catalyse la même réaction mais peut aussi catalyser la réaction inverse, à savoir le transport actif de protons du cytosol bactérien vers le périplasma en utilisant l'énergie délivrée par l'hydrolyse de l'ATP (fonction ATP-asiq). D'élégants protocoles ont permis de montrer que le fonctionnement de ce complexe s'accompagne de la rotation de certains de ses composants. C'est un exemple de **nanomoteur**.

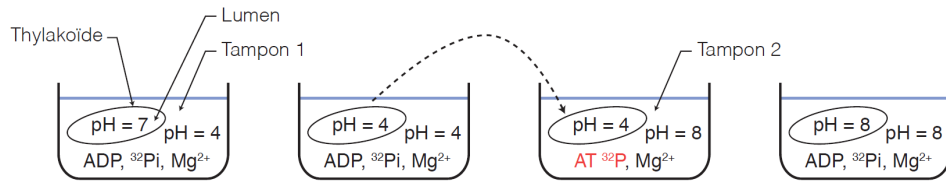
▲ FIGURE 18. **Organisation fonctionnelle de l'ATP synthase.** D'après PEYCRU *et al.* (2013).

β. Localisation des sphères pédonculées dans les organites semi-autonomes



▲ FIGURE 19. **Rappel de l'ultrastructure des organites semi-autonomes et localisation des sphères pédonculées.** D'après PEYCRU *et al.* (2013).

γ. Mise en évidence de l'importance de la force proton-motrice dans le fonctionnement de l'ATP synthase : expérience du « bain acide » de JAGENDORF & URIBE (1966)

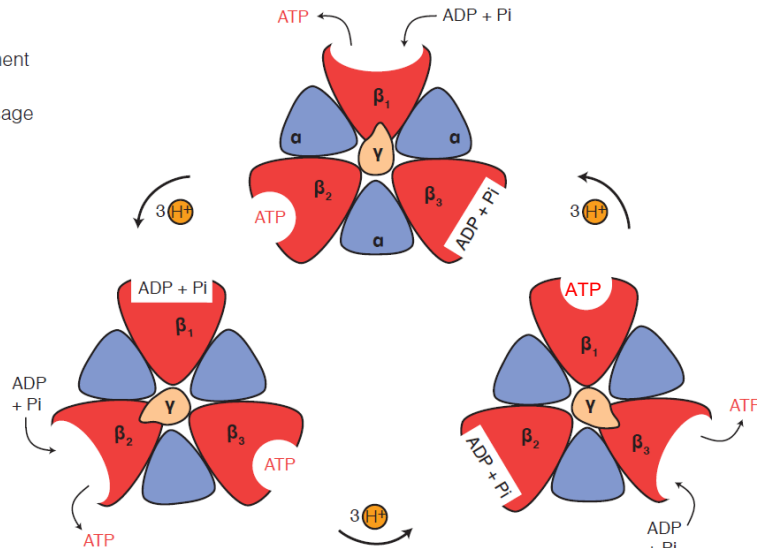


▲ FIGURE 20. Simplification des expériences (dite du « bain acide ») de JAGENDORF & URIBE (1966). D'après SEGARRA *et al.* (2014).

δ. Le fonctionnement séquentiel de l'ATP synthase

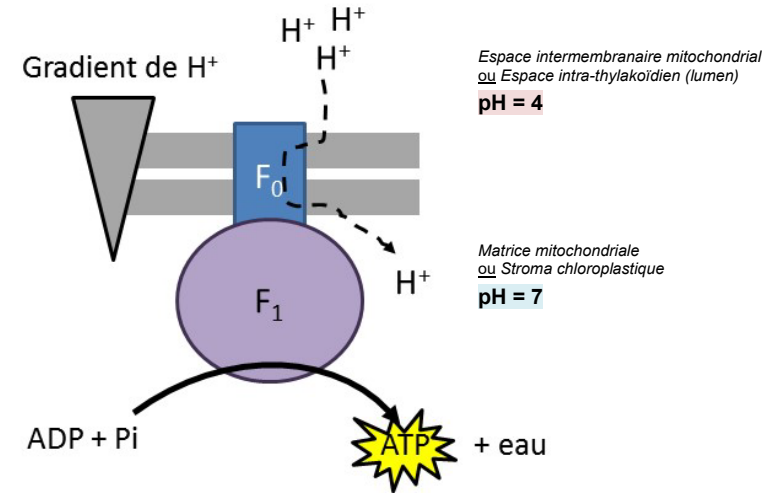
La sous-unité γ est mobile, les sous-unités α et β sont fixes.

Modèle de fonctionnement de la partie F_1 couplé au passage des protons

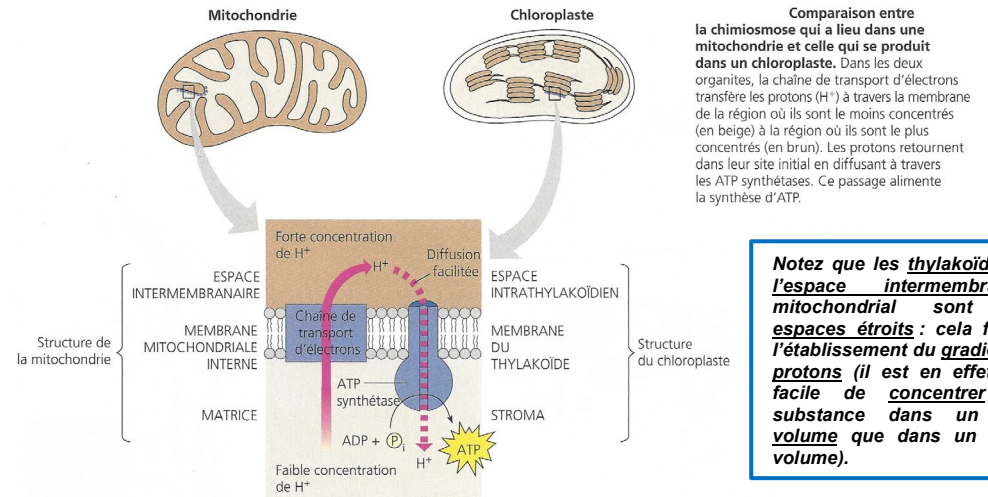


▲ FIGURE 21. Couplage entre la rotation de la chaîne γ et la synthèse d'ATP. [Attention, la numérotation des chaînes β ne correspond pas ici à la stœchiométrie, contrairement à la figure 18]. D'après SEGARRA *et al.* (2014), corrigé.

ε. L'essentiel : que retenir au minimum ?
Figures 22-23.



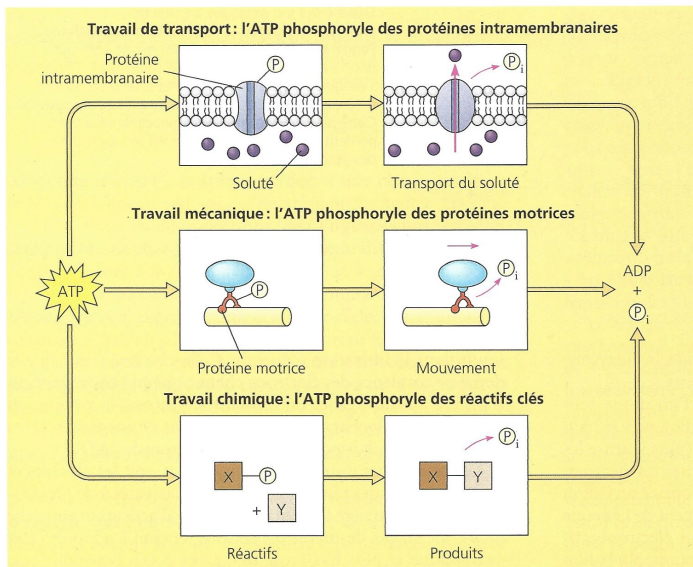
▲ FIGURE 22. L'ATP synthase et son fonctionnement : une vision synthétique. Schéma original 2015.



Notez que les thylakoïdes ou l'espace intermembranaire mitochondrial sont des espaces étroits : cela facilite l'établissement du gradient de protons (il est en effet plus facile de concentrer une substance dans un petit volume que dans un grand volume).

▲ FIGURE 23. L'ATP synthase dans les organites semi-autonomes. D'après CAMPBELL & REECE (2004)

3. L'ATP, une molécule aux multiples usages dans la cellule



Révision du rôle de l'ATP dans le travail cellulaire. Le transfert d'un groupement phosphate est le mécanisme à l'origine de la plupart des formes de travail cellulaire. Des enzymes délèguent un groupement phosphate de l'ATP et le transfèrent à une autre molécule. Celle-ci est phosphorylée : elle subit un changement qui produit du travail. Par exemple, l'ATP alimente le transport actif en phosphorylant des protéines intramembranaires spécialisées. Elle alimente aussi le travail mécanique en phosphorylant des protéines motrices, comme celles qui causent le déplacement des organites le long des microtubules du cytosquelette. Enfin, elle alimente le travail chimique en phosphorylant des réactifs clés. Les molécules phosphorylées perdent leur groupement phosphate à mesure que le travail s'accomplit, ce qui laisse de l'ADP et du phosphate inorganique (P_i). La respiration cellulaire reconstitue les réserves d'ATP en alimentant la phosphorylation de l'ADP.

▲ FIGURE 24. **Rôles énergétiques de l'ATP.** D'après CAMPBELL & REECE (2004)

a. Une molécule source d'énergie de nombreuses activités cellulaires

α. La synthèse de molécules organiques variées et de polymères : travaux chimiques (couplage chimio-chimique)

β. Le déplacement de compartiments et le mouvement : travaux mécaniques (couplage chimio-mécanique)

γ. Le déplacement transmembranaire d'une substance contre son gradient chimique ou électrochimique : travaux osmotiques (couplage chimio-osmotique)

b. Autres usages cellulaires de l'ATP

α. Un nucléotide polymérisable en ARN

β. Un précurseur de l'AMPc, un second messenger

γ. Une molécule de contrôle du métabolisme

- i. Un contrôle direct inhibiteur ou activateur de l'activité enzymatique
- ii. Une participation au contrôle par modification covalente des enzymes

Bilan (adapté du programme)

- ✓ La **présentation** des différentes **voies métaboliques** est l'occasion de faire ressortir **trois formes d'énergie privilégiées** dans la cellule, à savoir l'énergie d'**hydrolyse de l'ATP**, l'énergie des **réactions d'oxydo-réduction** et l'énergie des différences de **potentiels électrochimiques transmembranaires**.
- ✓ Elle permet d'aborder **deux modes de production d'ATP**, par **transphosphorylation** ou par **conversion énergétique** d'une **différence de potentiel électrochimique de protons** au niveau des membranes.
- ✓ L'étude des **chaînes de transport d'électrons** associées à ces voies montre qu'elles reposent sur des **réactions d'oxydo-réduction** en chaîne, utilisent ou créent du **pouvoir réducteur** et génèrent un **gradient électrochimique de protons** (à l'origine de la **synthèse d'ATP**).
- ✓ L'ATP est **synthétisée** par **couplage osmochimique** grâce à l'**ATP synthase**.
- ✓ La **mise en évidence** de la **diversité** des **sources de matière et d'énergie** des cellules permet de distinguer **différents types trophiques** remobilisés par ailleurs dans le **programme** (en **écologie** et dans l'étude des **cycles biogéochimiques** et du fonctionnement des **sols**).
- ✓ L'**approvisionnement des cellules en matière organique** se fait, soit par **prélèvement direct** dans l'environnement (**hétérotrophes**), soit par **prélèvement puis réduction** de **matière minérale (autotrophes)**.

II. Le métabolisme autotrophe des cellules végétales : réduction du carbone d'origine minérale à la lumière

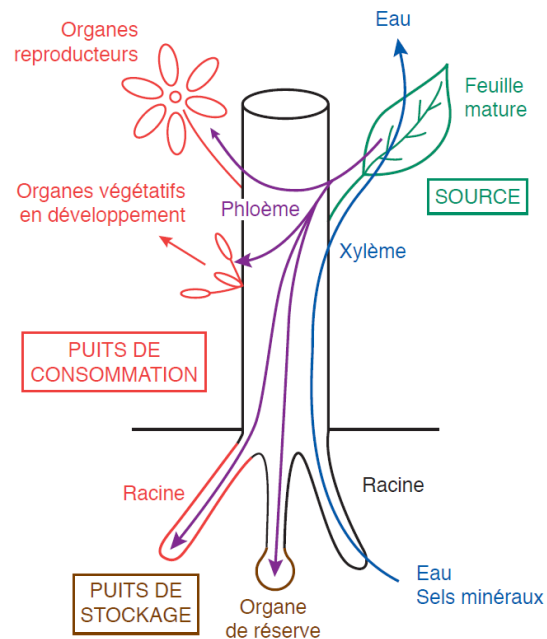
L'autotrophie à l'azote n'est pas au programme de BCPST1.

Capacités exigibles

- ✓ **Construire** un bilan de matière et d'énergie du cycle de CALVIN.
- ✓ **Schématiser** l'organisation fonctionnelle de la chaîne photosynthétique.
- ✓ **Expliquer** le modèle de la chaîne photosynthétique en utilisant les variations de potentiel d'oxydoréduction ($\Delta E'$) et d'enthalpie libre de réaction ($\Delta rG'$).
- ✓ **Relier** le principe de la conversion d'énergie aux caractéristiques de l'ATP-synthase.

A. La plante, organisme constitué de tissus autotrophes et hétérotrophes, ce qui suppose des corrélations trophiques entre cellules

Revoir le chapitre 2 (Fabacée)



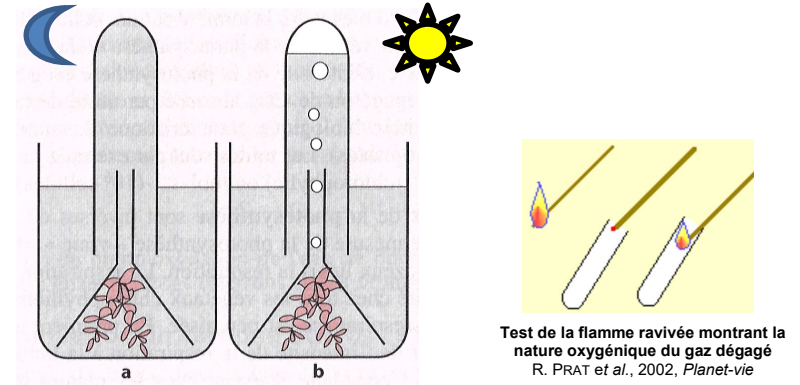
Le cas présenté est celui d'une angiosperme pendant une journée d'été. Flèche bleue : sève brute ; flèche violette : sève élaborée.

▲ FIGURE 25. Corrélations trophiques entre organes chez Angiospermes (été).
D'après SEGARRA *et al.* (2015).

B. La réduction du CO₂ et la synthèse glucidique en présence de lumière : la photosynthèse en C3

1. Mise en évidence d'une synthèse de matière organique à la lumière en présence de dioxyde de carbone

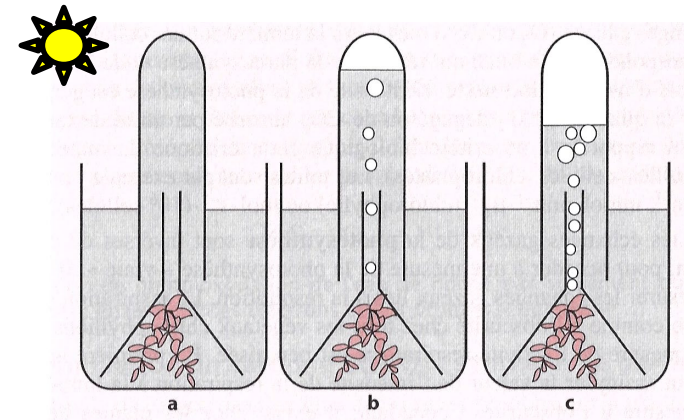
a. Dégagement de dioxygène à la lumière et en présence de CO₂



Test de la flamme ravivée montrant la nature oxygénique du gaz dégagé
R. PRAT *et al.*, 2002, *Planet-vie*

Émission d'O₂ par des feuilles d'Élodée dans l'eau du robinet

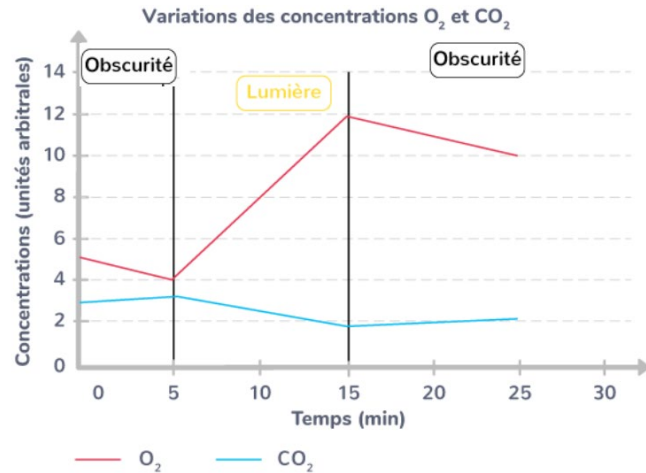
a) Obscurité, b) Lumière.



Émission de dioxygène par des feuilles d'Élodée éclairées.

a) Dans l'eau distillée, b) dans de l'eau du robinet et c) dans de l'eau additionnée d'hydrogencarbonate ou bicarbonate de sodium à 1%. C'est en c) que la production de bulles d'oxygène est la plus importante.

▲ FIGURE 26. Dégagement gazeux oxygénique à la lumière en présence de CO₂.
D'après MORT-GAUDRY *et al.* (2009).

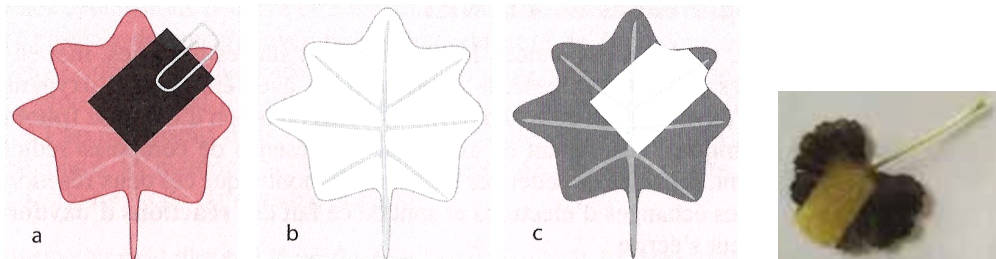


Outre la respiration (de 0 à 5 min et de 15 à 25 min), productrice de CO_2 et consommatrice d' O_2 , un phénomène se manifeste en présence de lumière (de 5 à 15 min), consommant du CO_2 et produisant de l' O_2 : la photosynthèse.

▲ FIGURE 27. Mise en évidence de la photosynthèse par ExAO.

<https://www.kartable.fr/ressources/svt/cours/la-plante-productrice-de-matiere-organique/53685>
(consultation avril 2023)

b. Production de matière organique carbonée à la lumière



Synthèse d'amidon par la feuille à la lumière.

La feuille est partiellement (cachée) éclairée (a). Après quelques heures, elle est décolorée par de l'alcool bouillant (b) et mise en présence de lugol (solution d'iodure de potassium iodée) qui révèle l'amidon uniquement dans la région éclairée de la feuille (c). La même expérience réalisée en absence de CO_2 ne montre aucune synthèse d'amidon. Il en est de même si la feuille est placée constamment à l'obscurité.

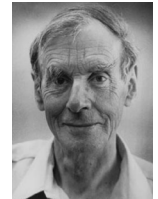
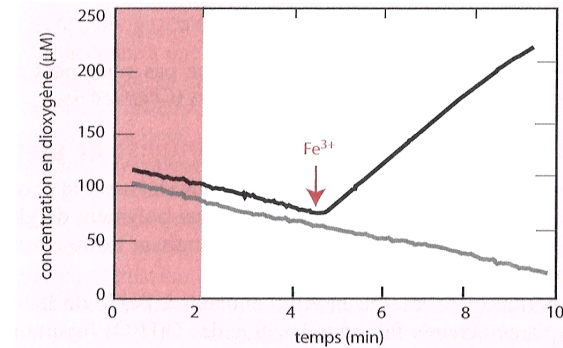
▲ FIGURE 28. Synthèse d'amidon à la lumière. D'après MORT-GAUDRY *et al.* (2009).

▲ Résultat.

Planet-vie

(R. PRAT *et al.* 2022)

c. L'importance d'un composé oxydé subissant une réduction lors des réactions à la lumière : l'expérience de HILL (1937)



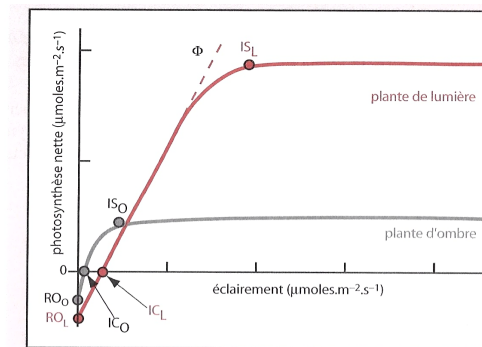
▲ R. HILL.
Wikipédia

Émission de dioxygène (mesurée par une électrode à oxygène) à la lumière par des chloroplastes isolés, en absence de CO_2 .

En présence d'un accepteur d'électrons (trace noire), du dioxygène est dégagé, traduisant la réduction de ferricyanure (Fe^{3+}) en ferrocyanure (Fe^{2+}). Ce dégagement n'est pas observé en absence de ferricyanure (trace grise)

▲ FIGURE 29. Expérience de HILL (1937). D'après MORT-GAUDRY *et al.* (2009).

d. La lumière et le CO_2 comme facteurs limitants de la photosynthèse et la notion de point de compensation



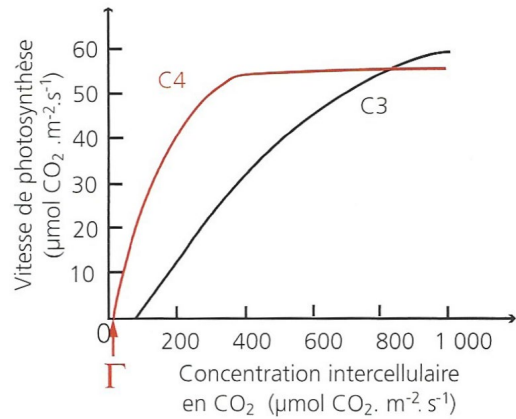
Assimilation nette de CO_2 en fonction de l'éclairement de plantes d'ombre (O) et de lumière (L).

Φ , rendement quantique ; I, intensité ; IC , intensité de l'éclairement au point de compensation pour la lumière ; IS , intensité de l'éclairement saturant ; IC_L est supérieur à IC_O et IS_L supérieur à IS_O ; R_O , valeur de la respiration à l'obscurité (rejet de CO_2).

▲ FIGURE 30. Impact de l'éclairement sur la photosynthèse nette.

D'après MORT-GAUDRY *et al.* (2009).

IC : point de compensation. IS : point de saturation



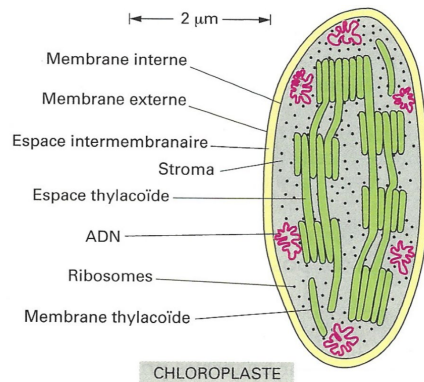
comparaison de la photosynthèse C3 et C4 à différentes concentrations en CO₂ dans les espaces intercellulaires

▲ FIGURE 31. **Impact de la disponibilité en CO₂ dans les méats sur l'intensité de la photosynthèse : comparaison d'une plante en C4 et d'une plante en C3.**

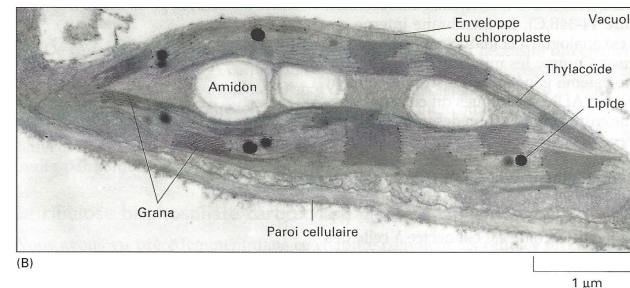
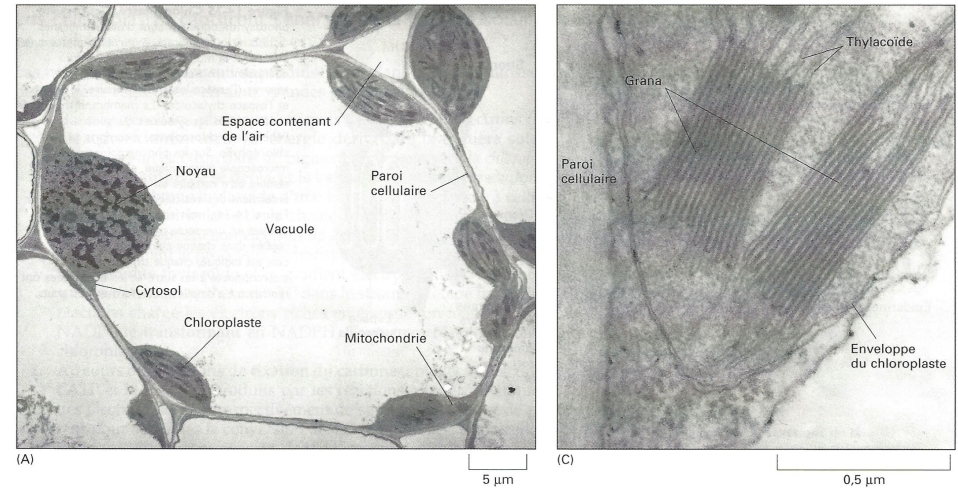
D'après MEYER *et al.* (2008). Γ : point de compensation au CO₂ des plantes en C4.

2. La photosynthèse, une réduction du CO₂ en matière organique au moyen de l'énergie lumineuse qui a lieu dans les chloroplastes

Vous devez **maîtriser parfaitement l'ultrastructure des chloroplastes** et l'ensemble des informations qui s'y rapportent abordées dans le **chapitre 6 sur la cellule**. N'oubliez pas l'**origine endosymbiotique de ces organites**.



▲ FIGURE 32. **Organisation d'un chloroplaste : rappels.** D'après ALBERTS *et al.* (2004)



Photographie en microscopie électronique des chloroplastes. (A) Dans une cellule de feuille de blé, un mince anneau de cytoplasme – contenant les chloroplastes, le noyau et les mitochondries – entoure une grosse vacuole. (B) Fine coupe d'un seul chloroplaste montrant son enveloppe, les granules d'amidon et les gouttelettes lipidiques (graisse) qui se sont accumulées dans le stroma du fait de la biosynthèse qui s'y produit. (C) Vue au fort grossissement de deux grana. Un granum est un empilement de thylacoïdes. (Due à l'obligeance de K. Plaskitt.)

▲ FIGURE 33. **Ultrastructure d'une cellule végétale avec un gros plan sur le chloroplaste : rappels.** D'après ALBERTS *et al.* (2004)

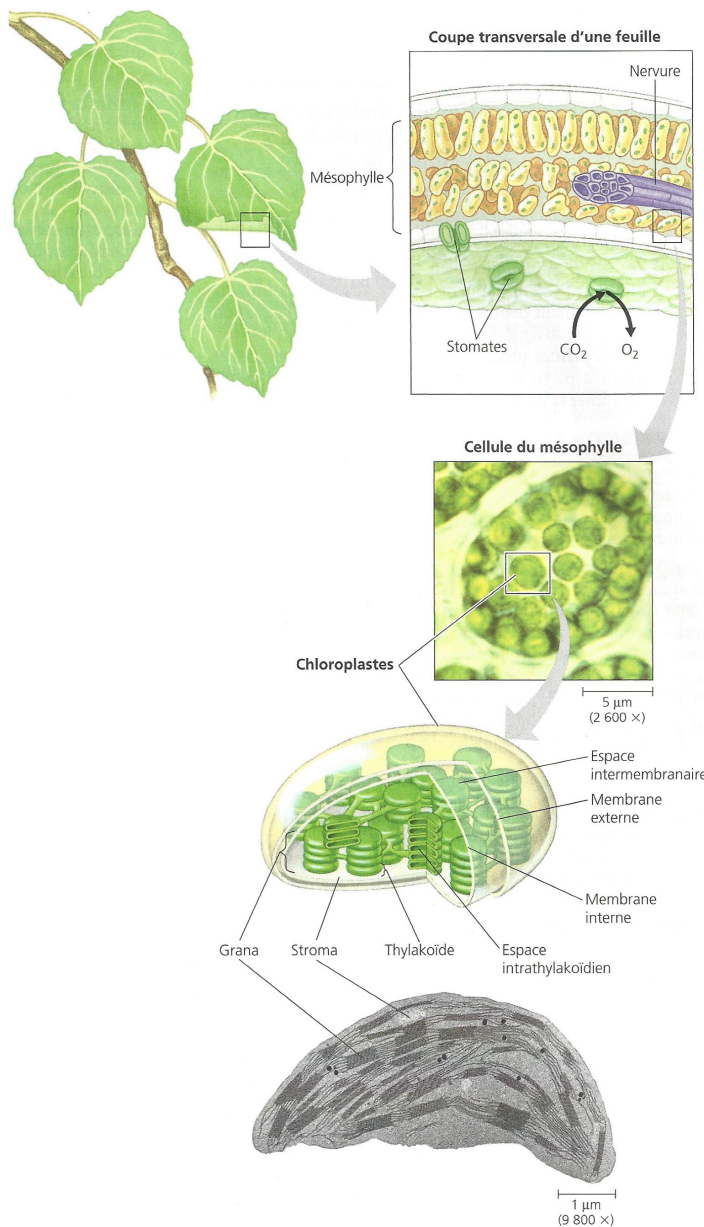
3. La phase photochimique de la photosynthèse : captation et conversion d'énergie lumineuse en ATP et pouvoir réducteur (couplage photochimique) au niveau des thylacoïdes

a. Des structures favorisant la captation de lumière : localisation du processus aux différentes échelles

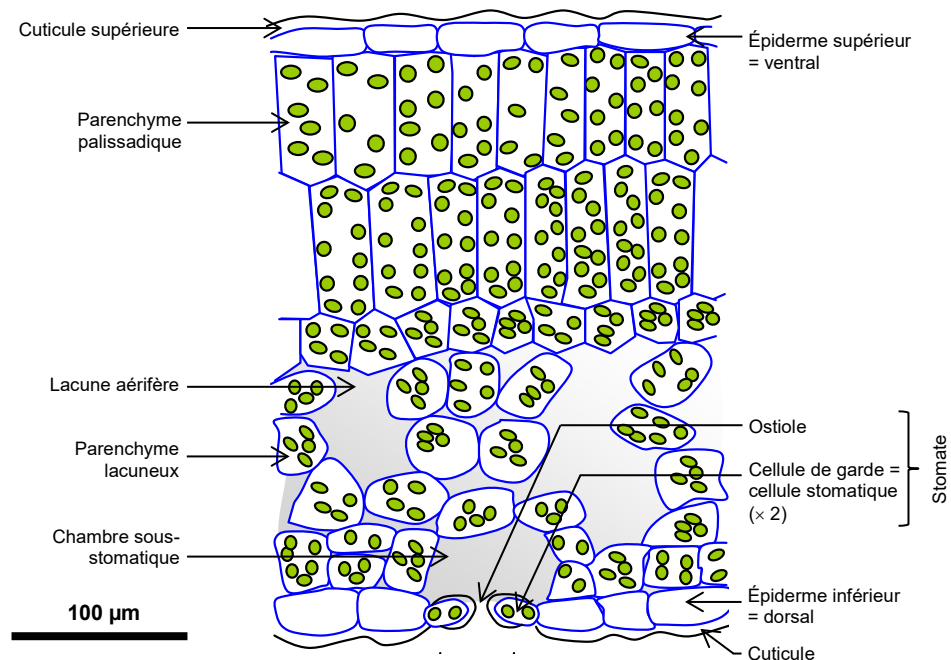
α. À l'échelle de l'organe : la feuille, organe aplati et fin favorisant la captation de lumière

β. À l'échelle du tissu : la feuille, un organe riche en parenchyme chlorophyllien

Site de la photosynthèse dans une plante. Les feuilles sont les principaux organes de la photosynthèse chez les Végétaux. Les illustrations représentent des agrandissements successifs allant de la feuille à la cellule, puis au chloroplaste (le site de la photosynthèse). Les échanges gazeux entre le mésophylle (soit le tissu interne des feuilles) et l'atmosphère s'effectuent par des pores microscopiques appelés stomates. Les chloroplastes, qui se trouvent majoritairement dans le mésophylle, sont entourés d'une double membrane; ils contiennent un liquide dense appelé stroma. La membrane des thylakoïdes (des sacs membraneux aplatis) isole le stroma de l'espace intrathylakoïdien. Les thylakoïdes forment des empilements appelés grana. (Au milieu, à droite, MP; en bas, à droite, MET.)



▲ FIGURE 34. Localisation de la photosynthèse à diverses échelles.
D'après CAMPBELL & REECE (2004)



▲ FIGURE 35. Coupe transversale d'une feuille d'Angiospermes Eudicotylédones.
http://svt.ac-dijon.fr/schemassvt/article.php3?id_article=1356 (consultation décembre 2015).

La feuille : relation structure-fonction

- **Un parenchyme foliaire capable de capter et convertir l'énergie lumineuse**
 - Grande surface de réception de la lumière liée à l'aplatissement de l'organe
 - Richesse en chloroplastes où se trouvent des pigments assimilateurs (fonctionnement et métabolisme à détailler) du mésophylle
 - Épaisseur fine permettant à la lumière de traverser l'organe et d'atteindre tous les chloroplastes
 - Conséquence de tout ça : organe spécialisé dans la photosynthèse
- **Des stomates et un épiderme cutinisé qui permettent des échanges gazeux contrôlés**
 - Méats, lacunes : permettent la circulation d'air > réalisation d'échanges gazeux photosynthétiques en journée
 - Stomates : permettent l'entrée et la sortie des gaz en journée // souvent fermés la nuit (contrôle par la pression de turgescence – à détailler) : réalisation des échanges gazeux respiratoires par diffusion intratissulaire
 - Épiderme : protection, sécrétion des cires de la cuticule
 - Cuticule : protection contre la déshydratation
- **Des nervures qui permettent le soutien et les relations avec les autres organes**
 - FCV : présence de xylème permettant l'importation d'eau et d'ions minéraux (= sève brute) + couplage avec évaporation et fonctionnement des stomates : moteur principal de la circulation de la sève brute

- **FCV** : présence de **phloème** > exportation de **métabolites** (notamment saccharose) vers les **organes puits** (charge du **phloème** à expliciter, rôle des **cellules compagnes**, moteur de la **circulation**)
- **FCV** : rôle de **soutien** des **tissus conducteurs primaires** voire **secondaires**,
- + importance des **tissus de soutien** autres (**sclérenchyme**, **collenchyme**)
- **NB** : **Pétiole** : assure **l'ancrage** et la **continuité fonctionnelle** avec le reste de la plante (riche en **nervures** : rôle de **soutien** + **conduction**).

γ. À l'échelle de la cellule, de l'organite et des molécules : des cellules dont les chloroplastes présentent des thylakoïdes riches en pigments assimilateurs

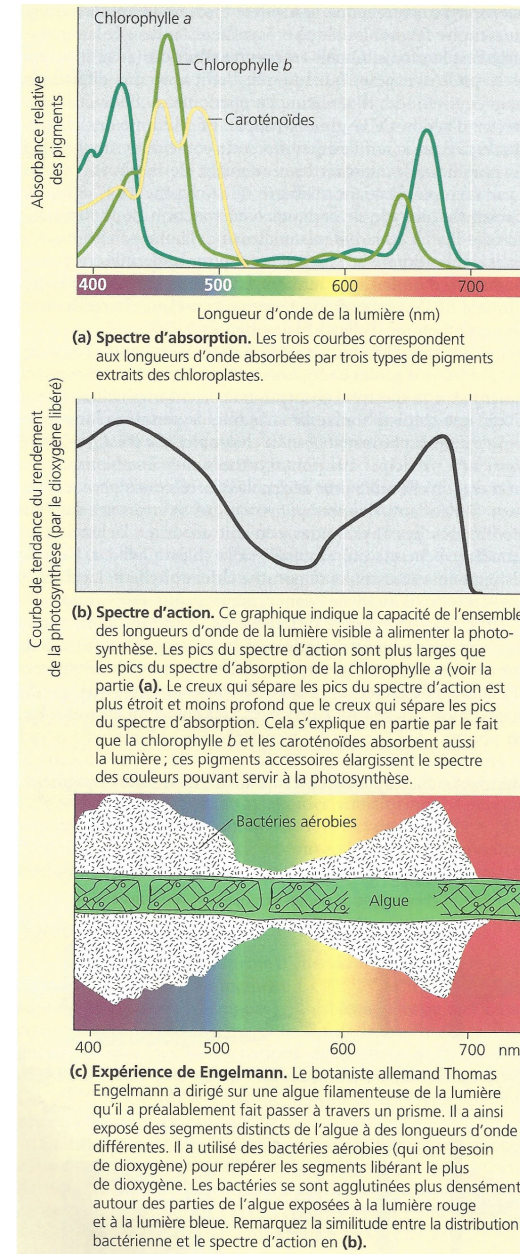
δ. Des pigments riches en liaisons conjuguées dont le spectre d'absorption correspond au spectre d'action de la photosynthèse (incl. expérience d'ENGELMANN)

Focus sur l'expérience historique d'ENGELMANN (1882)

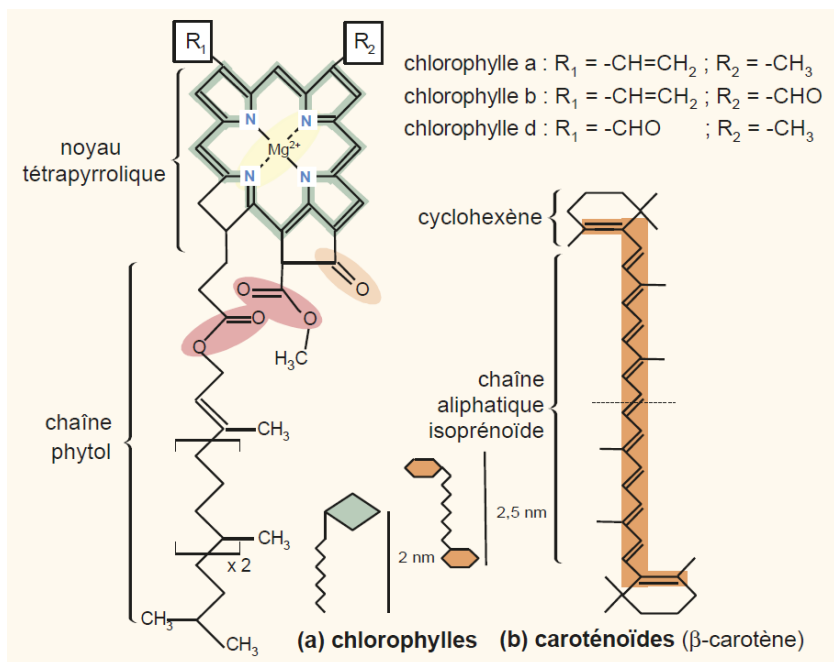
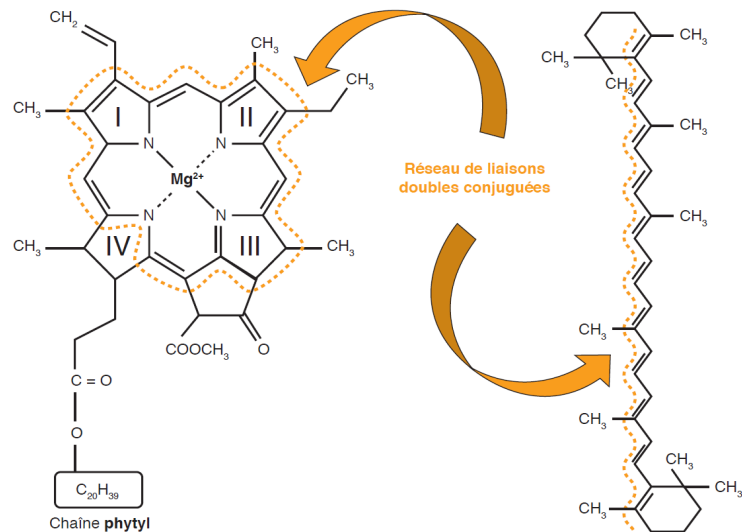
Le physiologiste allemand Theodor W. ENGELMANN (1843-1909) réalise en 1882 une expérience (figure 30.c) avec une algue (la Cladophore *Cladophora* sp.) et des Bactéries *Bacterium termo*, Bactéries aérobies capables d'utiliser le dioxygène libéré par les 'algues', comme l'auteur l'avait monté l'année précédente. En diffractant la lumière solaire sur un filament de Cladophore, il observe une croissance plus ou moins importante des colonies bactériennes à son endroit, en fonction de la longueur d'onde appliquée localement : il conclut que le dégagement de dioxygène et donc l'intensité de la photosynthèse sont plus importants à certaines longueurs d'onde, notamment dans le rouge et dans le bleu-violet, ce qui s'est révélé confirmé par les travaux ultérieurs.



▲ **T. W. ENGELMANN.**
Wikipédia



▲ **FIGURE 36. Spectre d'action et d'absorption des pigments photosynthétiques.**
D'après CAMPBELL & REECE (2004)



▲ FIGURE 37. **Chlorophylle a (à gauche) et β-carotène (à droite).**

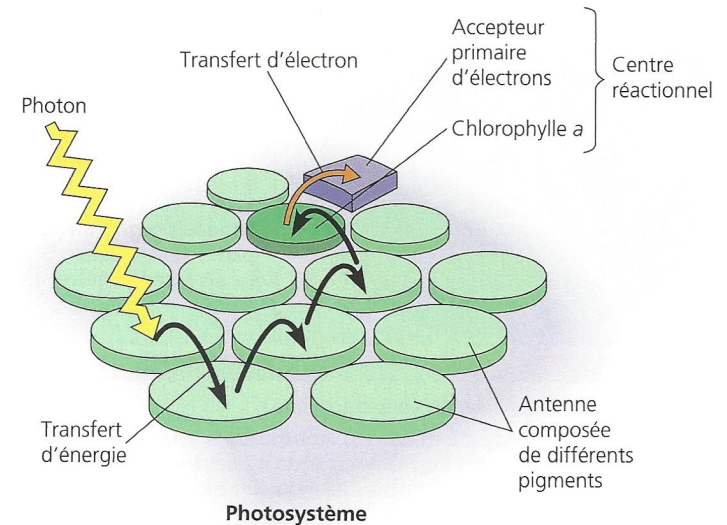
Notez l'important réseau de liaisons conjuguées.

D'après SEGARRA *et al.* (2014) et PERRIER, BEAUX *et al.* (2021). **Sachez faire des schémas simplifiés !**

b. Des mécanismes permettant la conversion de l'énergie lumineuse en ATP et pouvoir réducteur (couplage globalement photochimique)

a. Une conversion photochimique assurée par des photosystèmes (PS)

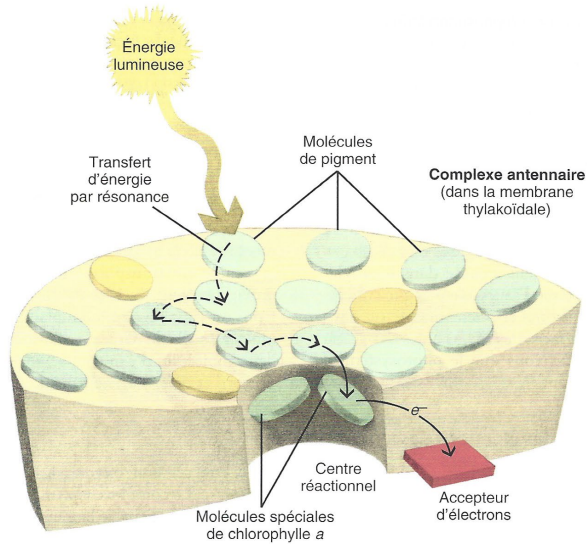
i. Les photosystèmes, complexes protéopigmentaires transmembranaires thylakoïdiens qui convertissent l'énergie lumineuse en énergie chimique au moyen d'une antenne collectrice et d'un centre réactionnel



Réception de la lumière dans un photosystème.

Les photosystèmes sont les unités photoréceptrices de la membrane des thylakoïdes. Chacun d'eux est formé d'un complexe de protéines et d'autres molécules organiques, et comprend une antenne composée de plusieurs centaines de molécules de pigments divers. Quand un photon frappe une molécule de pigment, l'énergie passe de molécule en molécule jusqu'à atteindre le centre réactionnel, où une molécule de chlorophylle a particulière transmet l'électron excité à un accepteur primaire d'électrons, une autre molécule organique spécialisée située dans le centre réactionnel.

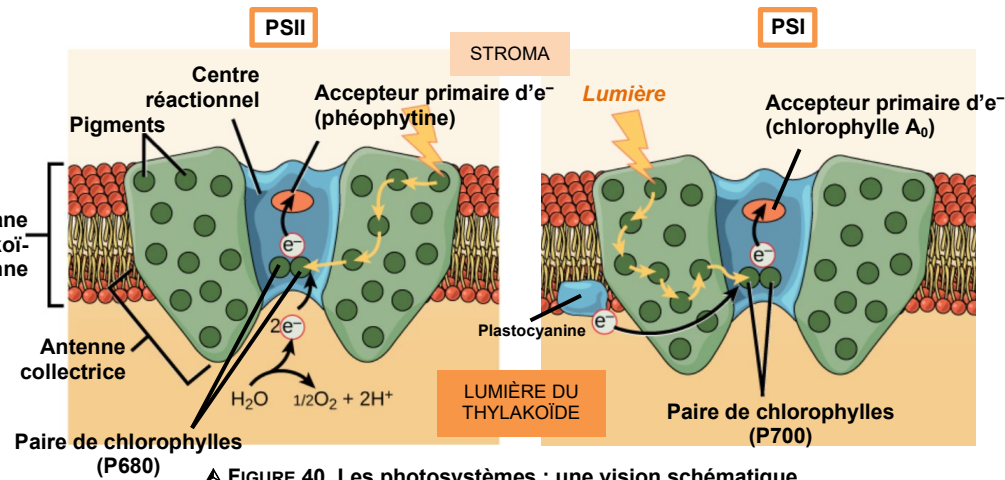
▲ FIGURE 38. **Transmission d'énergie dans un photosystème jusqu'à un centre réactionnel.**
D'après CAMPBELL & REECE (2004)



Transfert d'énergie durant la photosynthèse On voit ici une partie d'un complexe antennaire, présent dans la membrane des thylakoïdes. L'énergie lumineuse absorbée par une molécule de pigment à un endroit quelconque du complexe antennaire passe, suite à un transfert d'énergie par résonance, d'une molécule de pigment à une

autre jusqu'à atteindre une des deux molécules spéciales de chlorophylle a du centre réactionnel. Quand une molécule de chlorophylle a du centre réactionnel absorbe l'énergie, un de ses électrons est porté à un niveau énergétique supérieur et il est transféré à une molécule accepteuse d'électrons.

▲ FIGURE 39. **Transmission d'énergie dans un photosystème jusqu'à un centre réactionnel.**
D'après RAVEN *et al.* (2007b)

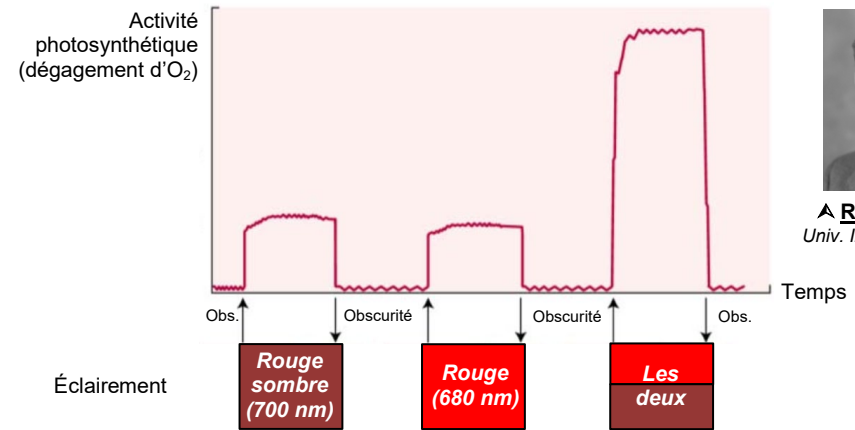


▲ FIGURE 40. **Les photosystèmes : une vision schématique de leur organisation et de leur fonctionnement.**

<https://www.khanacademy.org/science/ap-biology/cellular-energetics/photosynthesis/a/light-dependent-reactions> ou <https://oertx.highered.texas.gov/courseware/lesson/1651/student/?section=4> (consultation avril 2023)

- Dans le détail, un **photosystème** comprend fondamentalement **deux parties** :

ii. L'effet EMERSON (1957), une mise en évidence de l'existence de deux photosystèmes qui peuvent fonctionner isolément mais fonctionnent davantage en synergie



▲ R. EMERSON.
Univ. Illinois Archives

▲ FIGURE 41. **L'effet EMERSON (1957).**

<https://istudy.pk/emerson-enhancement-effect/> (consultation avril 2023)

Les **accepteurs primaires** d'électrons sont :

- Dans le cas du **PSII (P680)** : la **phéophytine** (une chlorophylle sans Mg^{2+}).
- Dans le cas du **PSI (P700)** : la **chlorophylle modifiée A₀**.

β. Une chaîne photosynthétique qui permet d'aboutir à la formation de pouvoir réducteur ($NADPH, H^+$) (couplage chimio-chimique) et d'un gradient de protons (couplage chimio-osmotique)

i. Diversité des composants de la chaîne photosynthétique et diagrammes énergétiques : notions de trajet acyclique (= schéma en Z) et de trajet cyclique

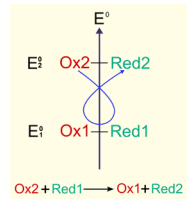
Encadré D Focus sur quelques éléments de la chaîne photosynthétique

Pour bien comprendre

L'oxydoréduction selon des potentiels redox croissants

- Rappelons qu'une réaction d'oxydoréduction se fait :
 - Entre l'oxydant d'un couple et le réducteur d'un autre ;
 - En appliquant la **règle du gamma** (figure a), entre l'oxydant du couple au potentiel redox le plus élevé et le réducteur du couple au potentiel redox le plus faible.
- Il s'ensuit que l'oxydoréduction se déroule dans le sens des **potentiels redox croissants** (tableau 1).

Cela explique pourquoi, sur les diagramme énergétiques, E° a un axe « vers le bas » (ex. sur la figure 42)



▲ FIGURE a. Règle du γ .

▼ TABLEAU 1. E° dans la chaîne photosynthétique.

Couple redox	E° (V)
H_2O / O_2	+ 0,82
P680 / P680 ⁺	+ 0,9
P680*/P680	- 0,8
Pheo (red/ox)	- 0,6
Q-A-QB(red/ox)	- 0,2
PQ (red/ox)	0
b6f (red/ox)	- 0,2 et + 0,2
P700 / P700 ⁺	+ 0,4
P700*/P700	-1,3
Ao (red/ox)	-1,0
Fd (red/ox)	- 0,42
NADPH / NADP ⁺	-0,32

Les valeurs varient d'un autour à l'autre...

Dans la chaîne : de multiples oxydoréductions consécutives impliquant des couples successifs aux potentiels redox croissants

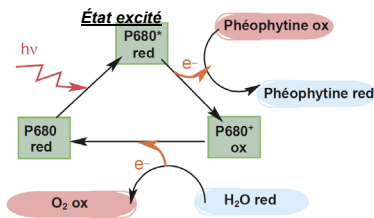
- Les réactions d'oxydoréduction catalysées par les oxydoréductases de la chaîne photosynthétique respectent ces principes ; leur bilan est forcément **exergonique**.
- Chaque réaction mobilise toutefois, en valeur absolue, de **moins en moins d'énergie libre** : le $\Delta R G^{\circ}$ des réactions est de plus en plus faible en valeur absolue (figure 44).
- Ce faisant, l'énergie libérée dans ces réactions assurent l'établissement endergonique d'un gradient de protons qui sont concentrés dans le lumen, notamment grâce au **complexe de cytochromes b6f** (figure 44).

Le rôle de la lumière : un changement de potentiel redox des doubles chlorophylles (P680 et P700) des centres réactionnels

- Problème : le potentiel redox du couple red / ox initial H_2O/O_2 est déjà très élevé, juste assez pour réduire l'oxydant du couple suivant (P680/P680⁺).

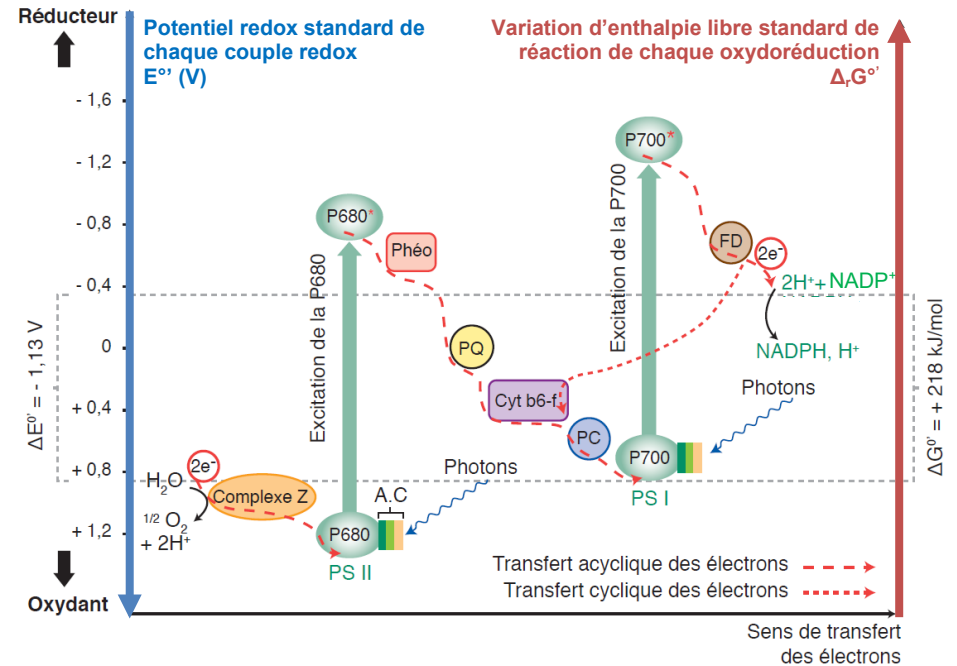
Contrairement à l'usage en chimie qui présente les couples sous forme ox / red, nos documents appliquent ici la forme red / ox... souplesse !

- C'est là que l'entrée de la lumière dans le « circuit » change tout ! L'énergie issue de la lumière excite les pigments et arrive grâce à l'antenne collectrice jusqu'au P680 et que P700 où, en changeant les paliers électroniques, elle change le potentiel redox (tableau 1 : encadrés + figure b) de ces composés à l'état excité (notés P680* et P700*) : il devient alors possible de réaliser les réactions suivantes !



▲ FIGURE b. Les trois états du P680. Inspiré et adapté de PERRIER, BEAUX et al. (2021)

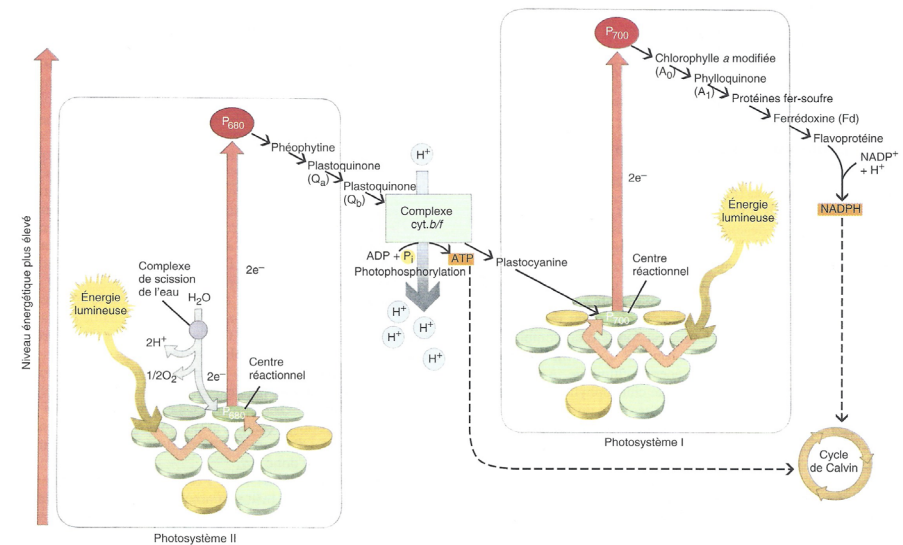
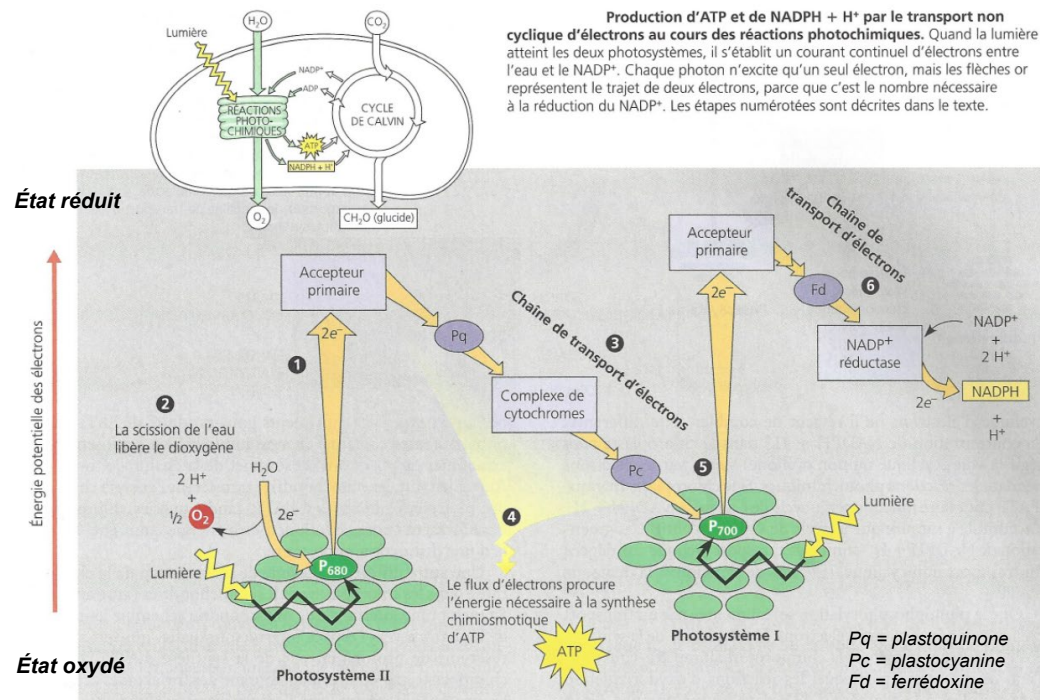
A.C: Antenne collectrice; Cyt b6-f: complexe cytochrome b6-f; FD: ferredoxine; Phéo: phéophytine; PS I, PS II: photosystèmes I et II; PC: plastocyanine; PQ: plastoquinone oxydée.



▲ FIGURE 42. Diagramme énergétique de la chaîne photosynthétique : transferts cyclique et acyclique sur le même diagramme. D'après SEGARRA et al. (2014), corrigé

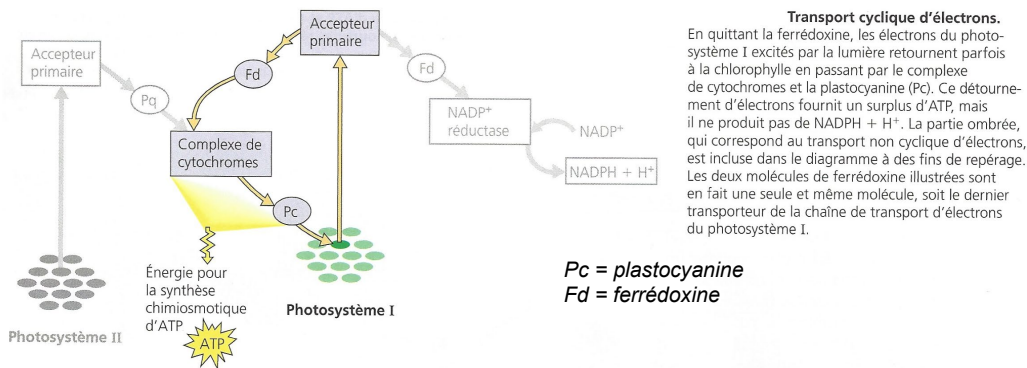
Notez l'existence de deux chemins électroniques :

- L'un employé lorsque les deux PS sont excités (lumière blanche) : schéma en Z (en lien avec sa forme dans le diagramme) = **transfert acyclique** [→ production d'ATP + pouvoir réducteur]
- L'autre plus court employé lorsque seul le PSI est excité (λ allant jusqu'à 700 nm) = **transfert cyclique** [→ production d'ATP seulement]



Flux non cyclique d'électrons et photophosphorylation Ce schéma en zigzag (schéma 2) montre le chemin suivi par les électrons pendant leur transfert de H₂O à NADP⁺ dans le flux non cyclique d'électrons, ainsi que les rapports énergétiques. Pour accroître l'énergie des électrons provenant de la photolyse de H₂O jusqu'au niveau nécessaire à la réduction de NADP⁺ en NADPH, chaque électron doit être excité deux fois (larges flèches rouges) par les photons absorbés dans les photosystèmes I et II. Après chaque étape d'excitation, les électrons excités « descendent » par les chaînes de transport d'électrons représentées par les flèches noires. Les protons sont pompés au travers de la membrane thylakoidale vers la lumière du thylakoïde pendant la réaction de scission de l'eau et pendant le transfert des électrons par le complexe du cytochrome b₆/f, ce qui produit le gradient protonique indispensable à la production d'ATP (voir figure 7-12 pour les détails de ce processus). La production d'ATP par flux d'électrons non cyclique est appelée photophosphorylation non cyclique.

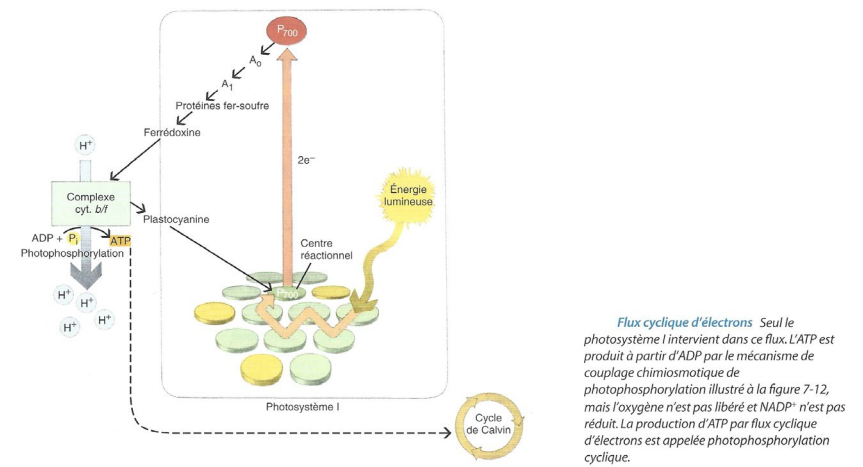
Transfert acyclique (« schéma en Z ») des électrons dans la chaîne photosynthétique



Transfert cyclique des électrons dans la chaîne photosynthétique

▲ FIGURE 43. Diagrammes énergétiques simplifiés de la chaîne photosynthétique.
D'après CAMPBELL & REECE (2004)

Transfert acyclique (« schéma en Z ») des électrons dans la chaîne photosynthétique



Transfert cyclique des électrons dans la chaîne photosynthétique

▲ FIGURE 44. Diagrammes énergétiques plus complets de la chaîne photosynthétique.
D'après RAVEN et al. (2007b)

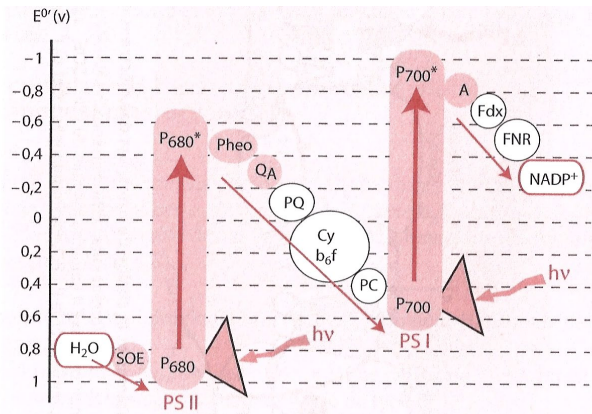
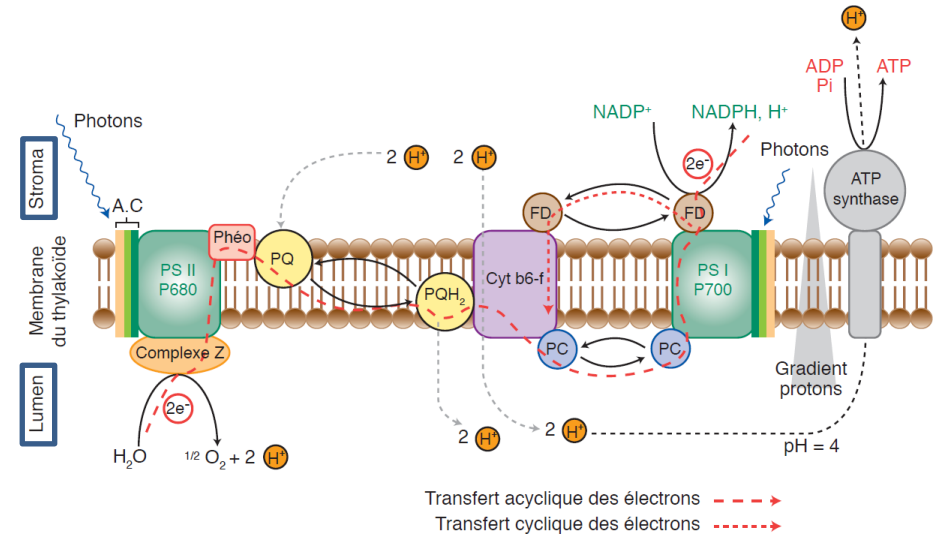


Schéma « en Z », transfert acyclique des électrons.

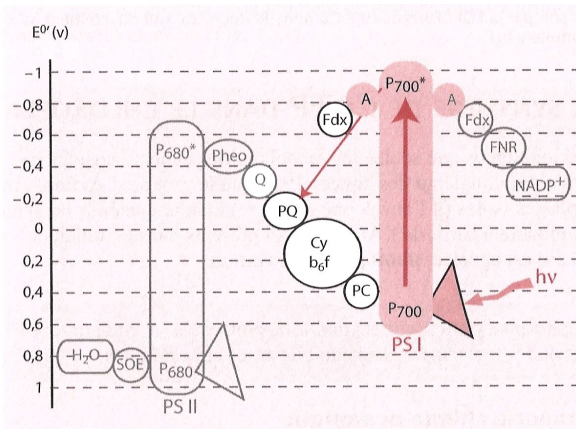
Par le jeu intégré des deux photosystèmes excités par la lumière, le transfert des électrons se réalise de l'eau à l'accepteur final, le NADP^+ ; A_0 , accepteur du PSI; Cy b_{6f} , complexe protéique cytochromes; Fdx , ferredoxine; FNR , Ferredoxine-NADP Réductase; SOE ou OEC , système d'oxydation de l'eau; P680 , paire spéciale de chlorophylles a du PSII; P700 , paire spéciale de chlorophylles a du PSI; PC , plastocyanine; Pheo , phéophytine; PSI , Photosystème I; PSII , photosystème II; Q_A , Quinone liée au PSII; PQ , Plastoquinones mobiles.



A.C: Antenne collectrice; Cyt b6-f : complexe cytochrome b_6-f ; FD : ferredoxine; Phéo : phéophytine; PS I , PS II : photosystèmes I et II; PC : plastocyanine; PQ : plastoquinone oxydée; PQH_2 : plastoquinone réduite.

▲ FIGURE 46. Représentation semi-détaillée de la chaîne photosynthétique.

D'après SEGARRA *et al.* (2014)



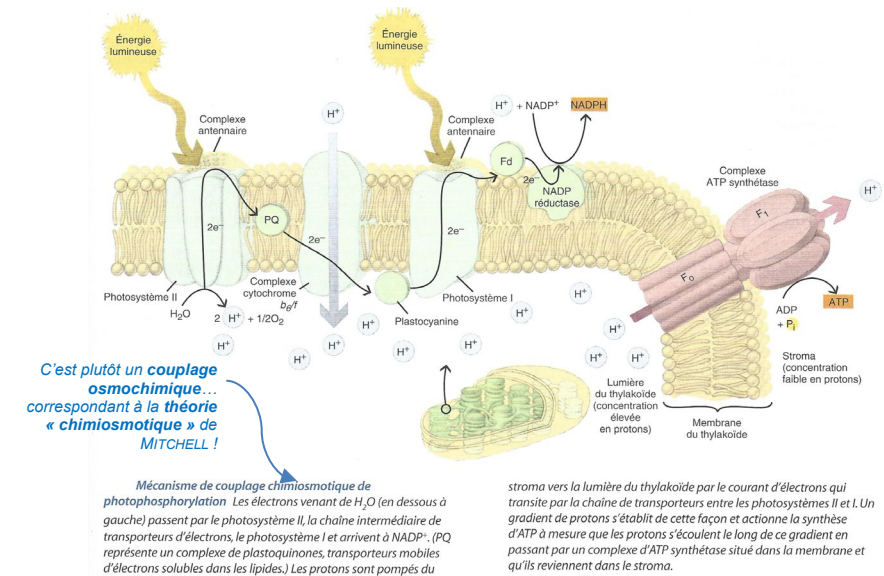
Transfert cyclique des électrons : schéma réalisé à partir du schéma en Z.

Le PSII n'intervenant pas, il n'y a en conséquence ni oxydation de l'eau ni réduction du NADP^+ . À la sortie du PSI, les électrons après avoir réduit la ferredoxine (Fdx), regagnent les quinones (PQ), le complexe b_6f , la plastocyanine (PC) et finalement le P700^+ qu'ils réduisent.

Transfert cyclique des électrons dans la chaîne photosynthétique

▲ FIGURE 45. Diagrammes énergétiques plus complets de la chaîne photosynthétique.

D'après MORT-GAUDRY *et al.* (2009).



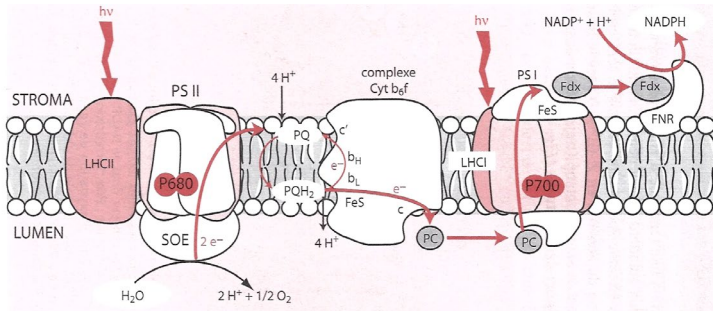
C'est plutôt un couplage osmochimique... correspondant à la théorie « chimiosmotique » de MITCHELL !

Mécanisme de couplage chimiosmotique de photophosphorylation Les électrons venant de H_2O (en dessous à gauche) passent par le photosystème II, la chaîne intermédiaire de transporteurs d'électrons, le photosystème I et arrivent à NADP^+ . (PQ représente un complexe de plastoquinones, transporteurs mobiles d'électrons solubles dans les lipides.) Les protons sont pompés du

stroma vers la lumière du thylakoïde par le courant d'électrons qui transite par la chaîne de transporteurs entre les photosystèmes II et I. Un gradient de protons s'établit de cette façon et actionne la synthèse d'ATP à mesure que les protons s'écoulent le long de ce gradient en passant par un complexe d'ATP synthétase situé dans la membrane et qu'ils reviennent dans le stroma.

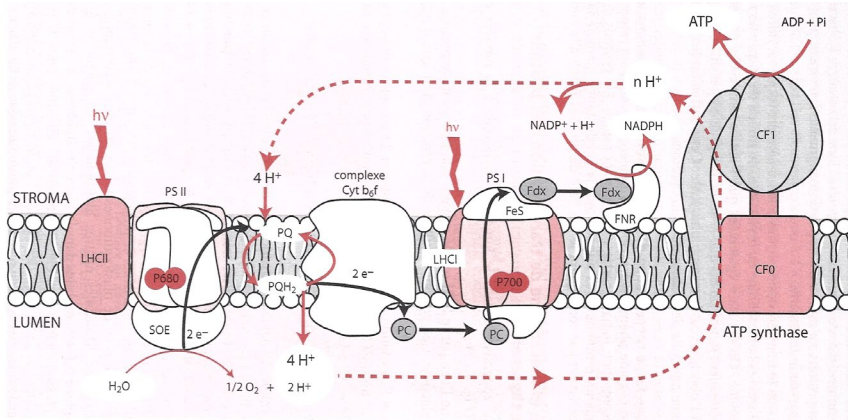
▲ FIGURE 47. Représentation simplifiée de la chaîne photosynthétique.

D'après RAVEN *et al.* (2007b)



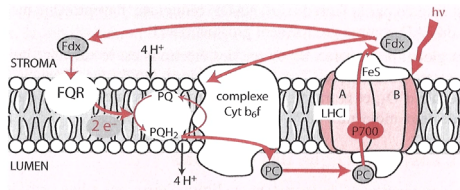
Les photosystèmes et la chaîne de transport des électrons de la membrane des thylakoïdes.

Cyt b₆f, complexe protéique cytochromes ; Fdx, ferrédoxine ; FNR, Ferrédoxine-NADP Réductase ; LHCI, Light Harvesting Complexe I (antenne du PSI) ; LHCII, Light Harvesting Complexe II (antenne majeure du PSII) ; SOE ou OEC, système d'oxydation de l'eau ; PC, plastocyanine ; PSI, Photosystème I ; PSII, photosystème II ; PQ, Plastoquinones ; c' et c'', cytochromes de type c ; b_H et b_L, cytochromes b respectivement à haut et bas potentiel.



Mouvements de protons au niveau de la membrane photosynthétique.

Les informations structurales contenues dans la figure 4.8 sont reportées dans cette figure. Les réactions sont établies pour l'oxydation d'une molécule d'eau et donc le transfert de deux électrons et la réduction d'une molécule de NADP⁺. L'énergie lumineuse est convertie en énergie chimique sous forme d'ATP grâce à l'énergie contenue dans les gradients de protons.

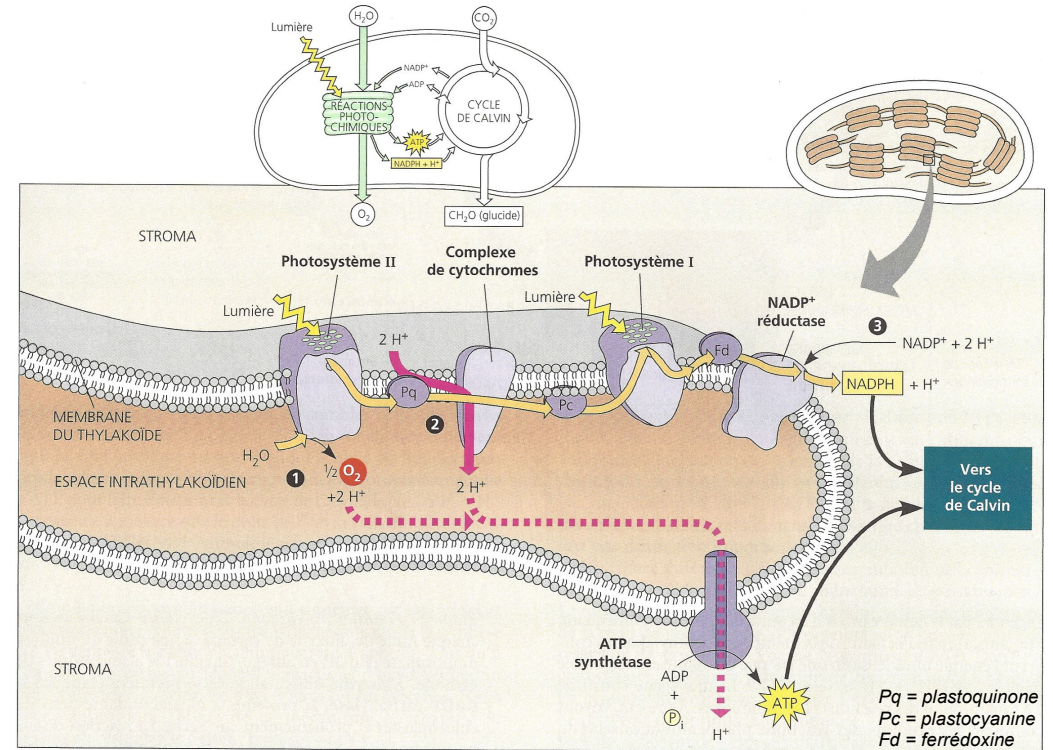


Transfert cyclique d'électrons autour du PSI dans la membrane du thylakoïde.

Après avoir réduit la ferrédoxine (Fdx), les électrons réduisent le pool de plastoquinones soit par la FQR (Ferrédoxine Quinone Réductase), soit directement au niveau du complexe b₆f.

▲ FIGURE 48. Divers schémas de la chaîne photosynthétique.

D'après MOROT-GAUDRY *et al.* (2009)



Les réactions photochimiques et la chimiosmose : l'organisation de la membrane des thylakoïdes.

Ce schéma illustre le modèle de la membrane des thylakoïdes qui prévaut à l'heure actuelle. Les flèches oranges représentent le trajet des électrons du transport non cyclique esquissé à la figure 10.12. À mesure que les électrons passent d'un transporteur à l'autre dans les réactions d'oxydoréduction, les protons extraits du stroma sont déposés dans l'espace intrathylakoïdien.

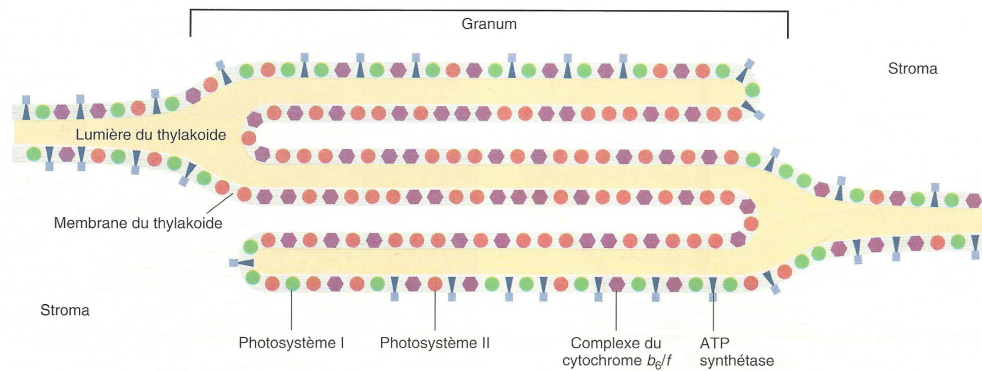
L'énergie est alors emmagasinée sous forme d'une force protonmotrice (gradient de H⁺). Au moins trois étapes des réactions photochimiques contribuent au gradient de protons.
 1 Le photosystème II entraîne la scission d'une molécule d'eau dans l'espace intrathylakoïdien grâce à une déshydrogénase.
 2 Quand la plastoquinone (Pq), un transporteur mobile, transfère les électrons au complexe de cytochromes, des protons sont importés dans l'espace intrathylakoïdien.

3 Le NADP⁺ capte deux protons dans le stroma lors de sa réduction en NADPH + H⁺. La diffusion des protons de l'espace intrathylakoïdien vers le stroma (suivant le gradient de concentration) alimente l'ATP synthétase. Ces réactions déclenchées par la lumière emmagasinent de l'énergie chimique dans le NADPH + H⁺ et dans l'ATP, qui fournissent de l'énergie au cycle de Calvin.

▲ FIGURE 49. Représentation simplifiée de la chaîne photosynthétique.

D'après CAMPBELL & REECE (2004).

ii. Une répartition des composés transmembranaires thylakoïdiens qui varie entre zones granaires et agraires



Organisation des photosystèmes des membranes des thylakoïdes Le photosystème II est principalement localisé dans les thylakoïdes des grana et le photosystème I, avec l'ATP synthétase, presque entièrement dans les thylakoïdes du stroma et les régions externes des grana. Notez que chaque complexe comprend un photosystème, un complexe antennaire et un centre réactionnel. Les

complexes de cytochrome b_6/f sont également répartis le long des membranes. La séparation spatiale des photosystèmes implique des transporteurs d'électrons mobiles, comme la plastoquinone et la plastocyanine, pour véhiculer les électrons entre les complexes membranaires séparés.

▲ **FIGURE 50. Répartition des photosystèmes au niveau de la membrane.**
D'après CAMPBELL & REECE (2004).

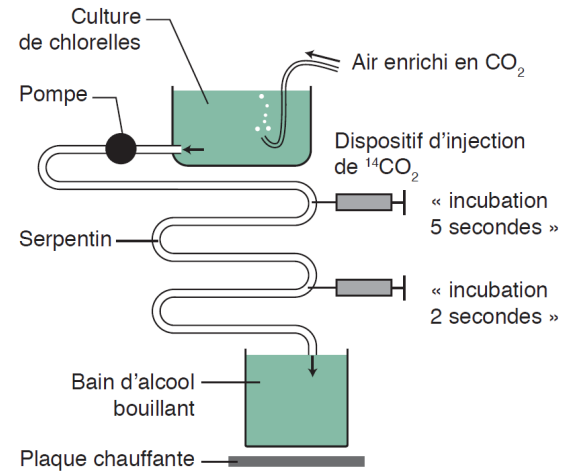
iii. Résultat du fonctionnement de la chaîne photosynthétique : production de pouvoir réducteur et d'un gradient de protons

γ. Un gradient de protons utilisé dans la synthèse d'ATP par l'ATP synthase : la photophosphorylation (couplage osmo-chimique)

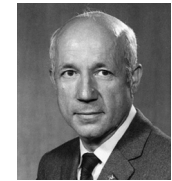
c. Bilan de la phase photochimique

4. La phase chimique de la photosynthèse : utilisation du pouvoir réducteur et de l'ATP dans la réduction du CO₂ en matière organique (couplage chimio-chimique)

a. Les expériences de CALVIN (avec BENSON et BASSHAM) et la mise en évidence des réactions de la phase chimique



Dispositif expérimental de CALVIN



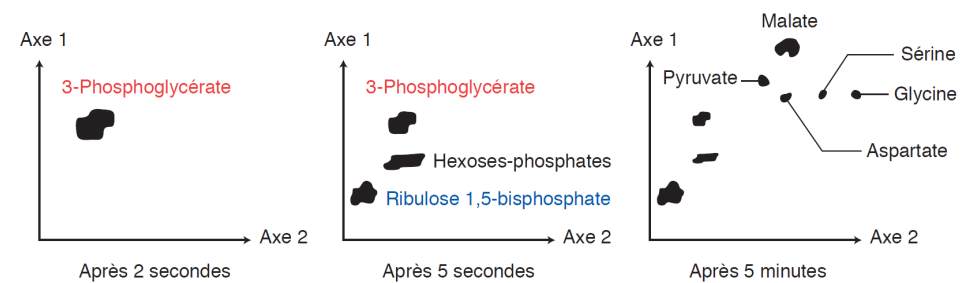
▲ **Melvin CALVIN.**
Wikipédia



▲ **Andy BENSON.**
UC San Diego



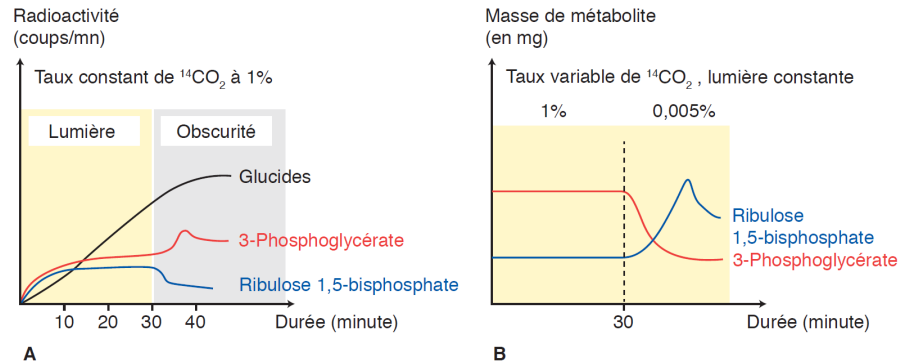
▲ **James BASSHAM.**
Source à préciser



Chromatogrammes obtenus pour différentes durées d'exposition au ¹⁴CO₂.

Résultats obtenus

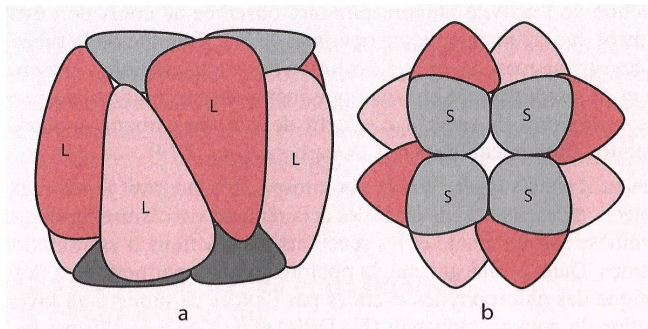
▲ **FIGURE 51. Expériences de CALVIN (années 1950).** D'après SEGARRA *et al.* (2014)



A. Suivi du marquage radioactif au $^{14}\text{CO}_2$ pour une culture de chlorelles selon des conditions d'éclairages différents ; B. selon des concentrations variables de CO_2 .

▲ FIGURE 52. Expériences complémentaires de CALVIN (années 1950).
D'après SEGARRA *et al.* (2014)

b. Le cycle de CALVIN-BENSON, des réactions en C3 utilisant de l'ATP et du pouvoir réducteur où la fixation du CO_2 est assurée par l'activité carboxylase de la RuBisCO



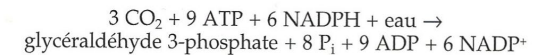
Structure schématique de la rubisco montrant les 8 grosses sous-unités (L) et les 8 petites sous-unités (S) de l'enzyme (deux couches centrales de 4L flanquées aux extrémités de 4S); a) vue latérale ; b) vue apicale.

▲ FIGURE 53. Organisation de la RuBisCO. D'après MOROT-GAUDRY *et al.* (2007)

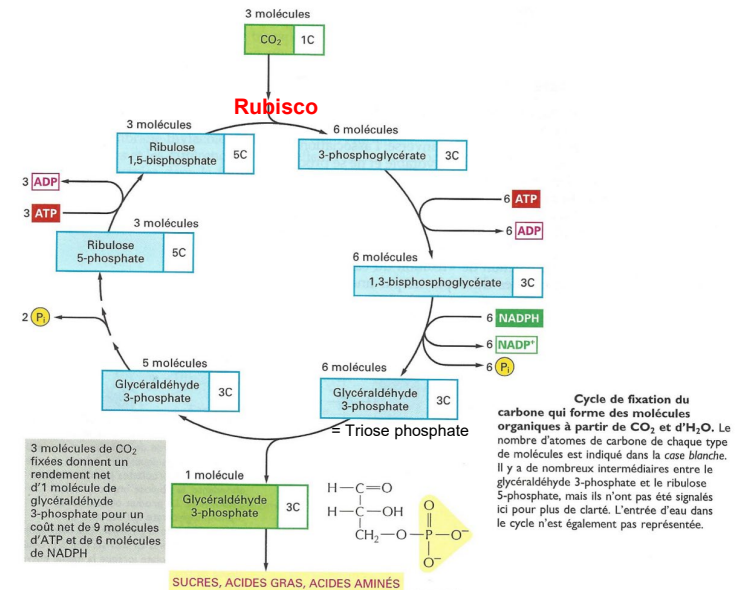
La réaction réelle de fixation du CO_2 est énergétiquement favorable à cause de la réactivité d'un composé riche en énergie, le *ribulose 1,5-bisphosphate*, auquel chaque molécule de CO_2 est ajoutée.

La voie métabolique complexe qui produit le ribulose 1,5-bisphosphate nécessite à la fois du NADPH et de l'ATP. Elle fut observée au cours d'une des premières applications réussies de l'utilisation des radioisotopes comme traceurs biochimiques. Ce cycle de fixation du carbone (appelé aussi cycle de Calvin) est schématisé dans la figure. Il commence par la fixation de 3 molécules de CO_2 par la ribulose bisphosphate carboxylase pour produire 6 molécules de 3-phosphoglycérate (contenant $6 \times 3 = 18$ atomes de carbone en tout; 3 issus du CO_2 et 15 du ribulose 1,5-bisphosphate). Les 18 atomes de carbone subissent alors un cycle de réactions qui régénère les 3 molécules du ribulose 1,5-bisphosphate utilisées dans l'étape initiale de fixation du carbone (contenant $3 \times 5 = 15$ atomes de carbone). Cela donne 1 molécule de *glyceraldéhyde 3-phosphate* (3 atomes de carbone) en gain net.

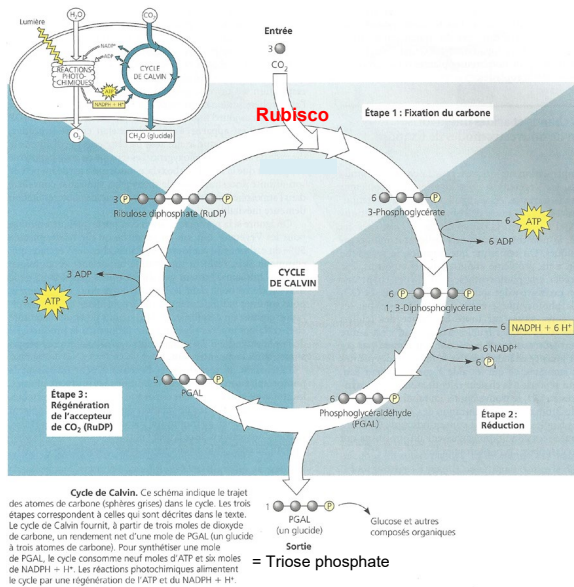
Au total 3 molécules d'ATP et 2 molécules de NADPH sont consommées lors de la conversion de chaque molécule de CO_2 en glucide. L'équation nette est :



D'après ALBERTS *et al.* (2004)

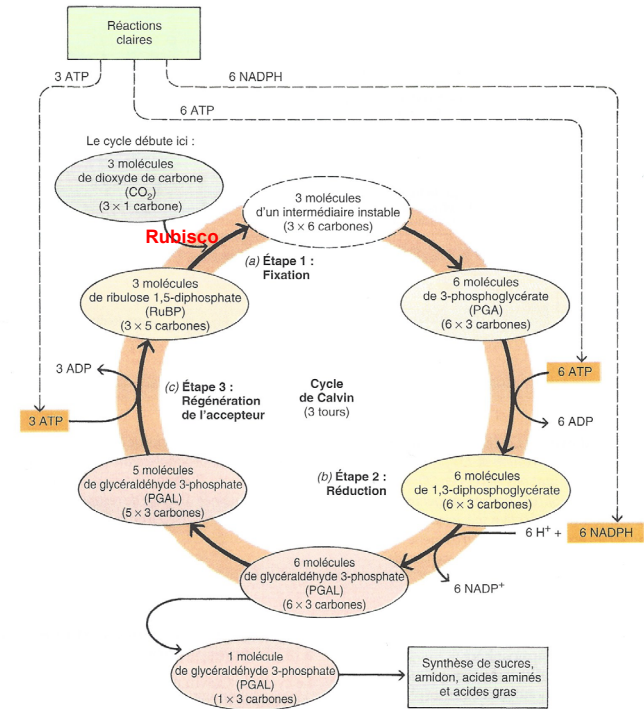


▲ FIGURE 54. Cycle de CALVIN-BENSON : première vision.
D'après ALBERTS *et al.* (2004)



▲ FIGURE 55. **Cycle de CALVIN-BENSON : deuxième vision.** D'après CAMPBELL & REECE (2004)

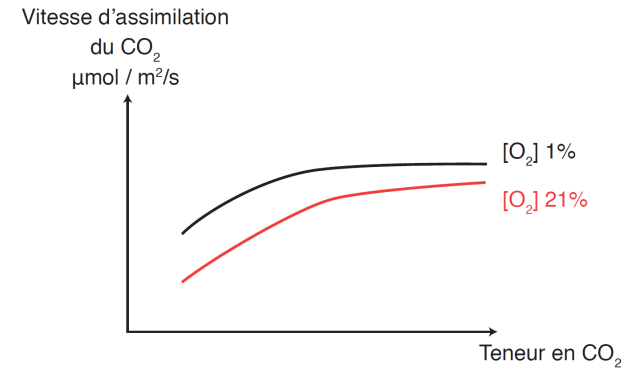
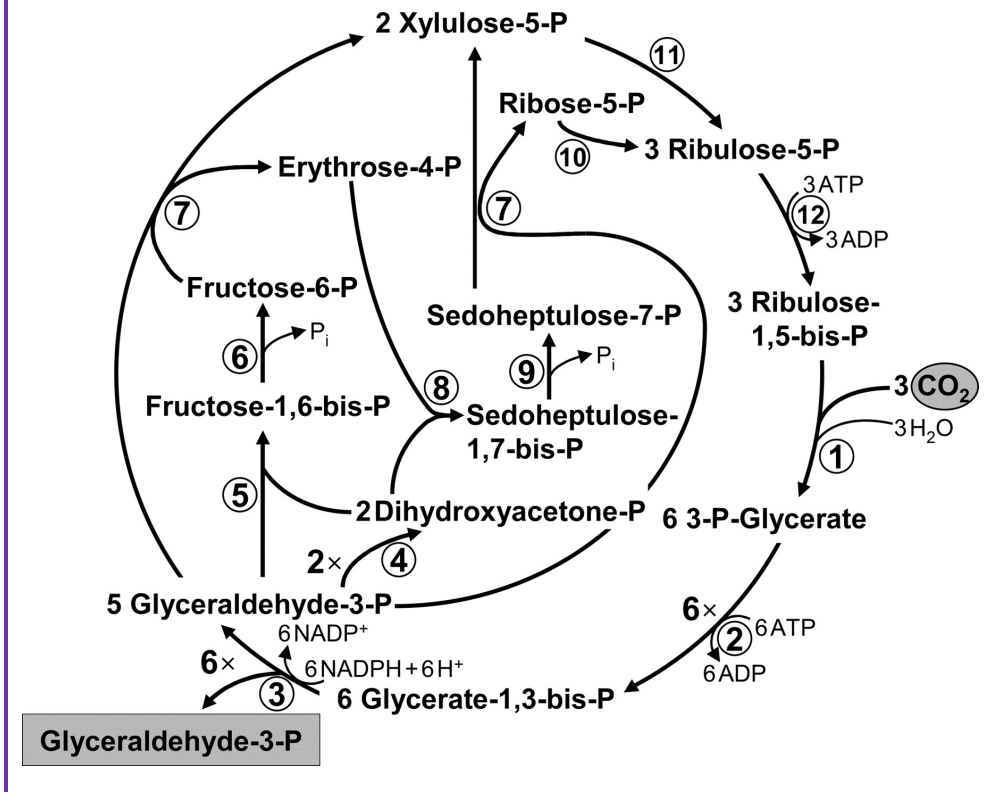
= Triose phosphate



▲ FIGURE 56. **Cycle de CALVIN-BENSON : troisième vision.** D'après RAVEN *et al.* (2007)

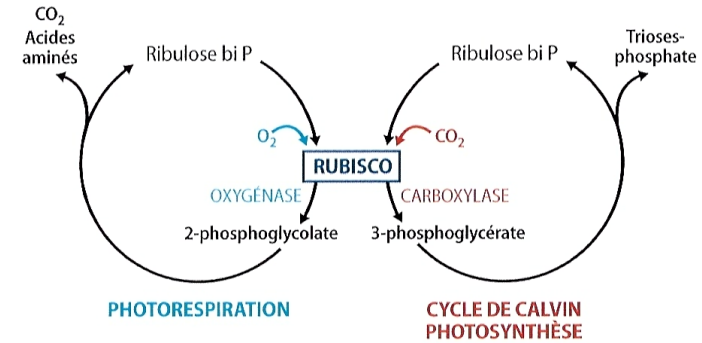
Encadré E Le cycle de CALVIN-BENSON complet : une voie métabolique complexe

Hors programme – c'est juste pour se rendre compte de la réalité
D'après BERG (2011)



▲ **Otto WARBURG.**
Nobelprize.org

▲ FIGURE 57. **Impact de la proportion atmosphérique d'O₂ sur l'assimilation du CO₂ par la rubisco (effet WARBURG).** D'après SEGARRA *et al.* (2014)



La compétition entre O₂ et CO₂ au niveau de l'activité de la RubisCO.

▲ FIGURE 58. **Compétition oxydation vs. carboxylation au niveau de la rubisco.** D'après DAUTEL *et al.* (2021)

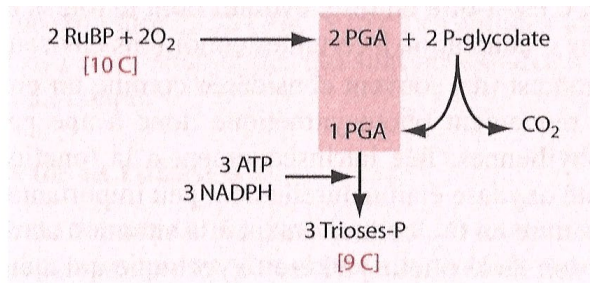
Pitié, si vous refaites le schéma... inversez les couleurs ! (O₂ rouge / CO₂ bleu)

c. La dualité carboxylase-oxydase de la RuBisCO et la photorespiration

α. Mise en évidence de la compétition entre dioxygène et dioxyde de carbone sur la rubisco : l'effet WARBURG (1919-1920)

β. Mécanismes de la photorespiration : une coopération chloroplaste-péroxyosome-mitochondrie

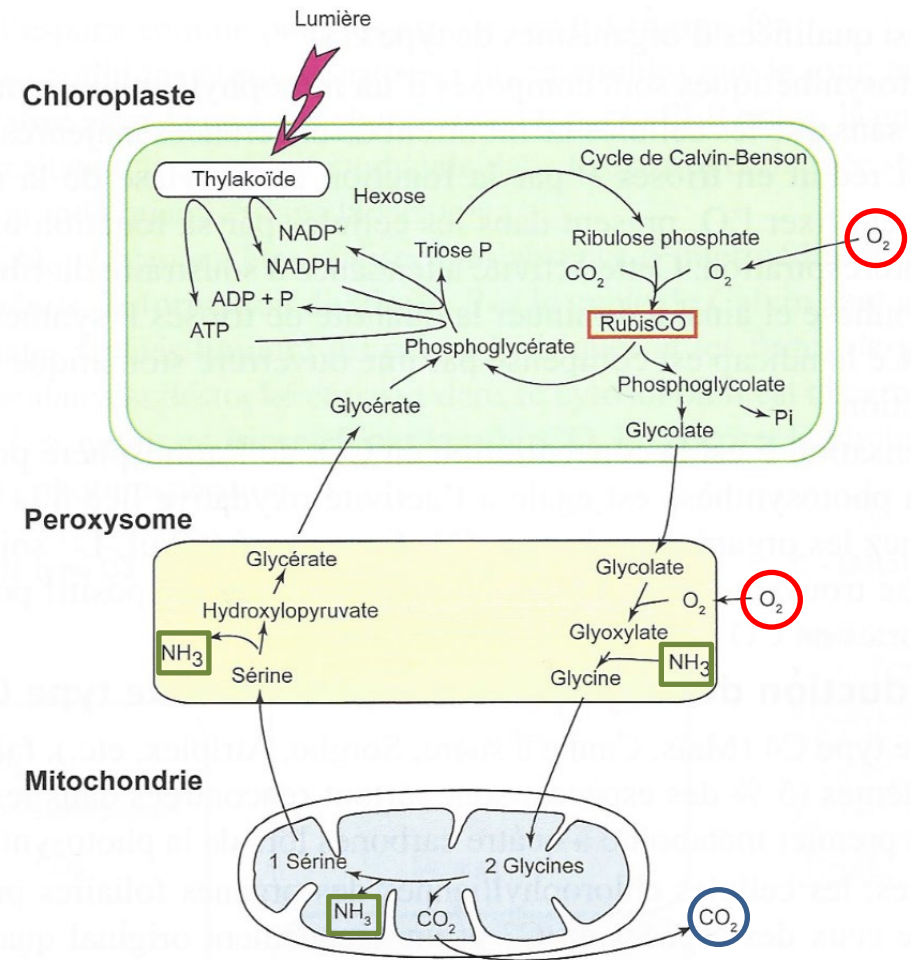
γ. Bilan et conséquences biologiques de la photorespiration



Bilan du carbone organique dans la photorespiration.

L'ensemble du processus photorespiratoire (oxygénation du RuBP + voie du glycolate) conduit à la récupération de 90 % du carbone organique entrant sous forme de RuBP et qui se retrouve sous forme de trioses-P.

▲ FIGURE 59. Rendement carbone de la photorespiration. D'après MOROT-GAUDRY *et al.* (2007)



▲ FIGURE 60. La photorespiration ou voie du glycolate. D'après RICHARD *et al.* (2015)

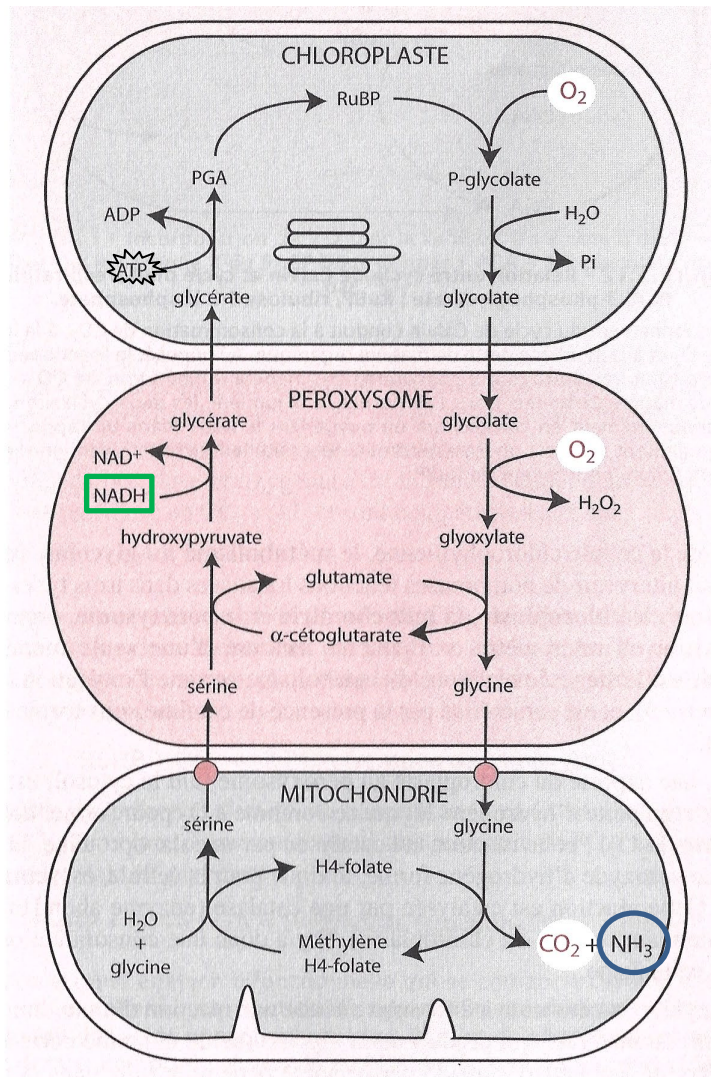
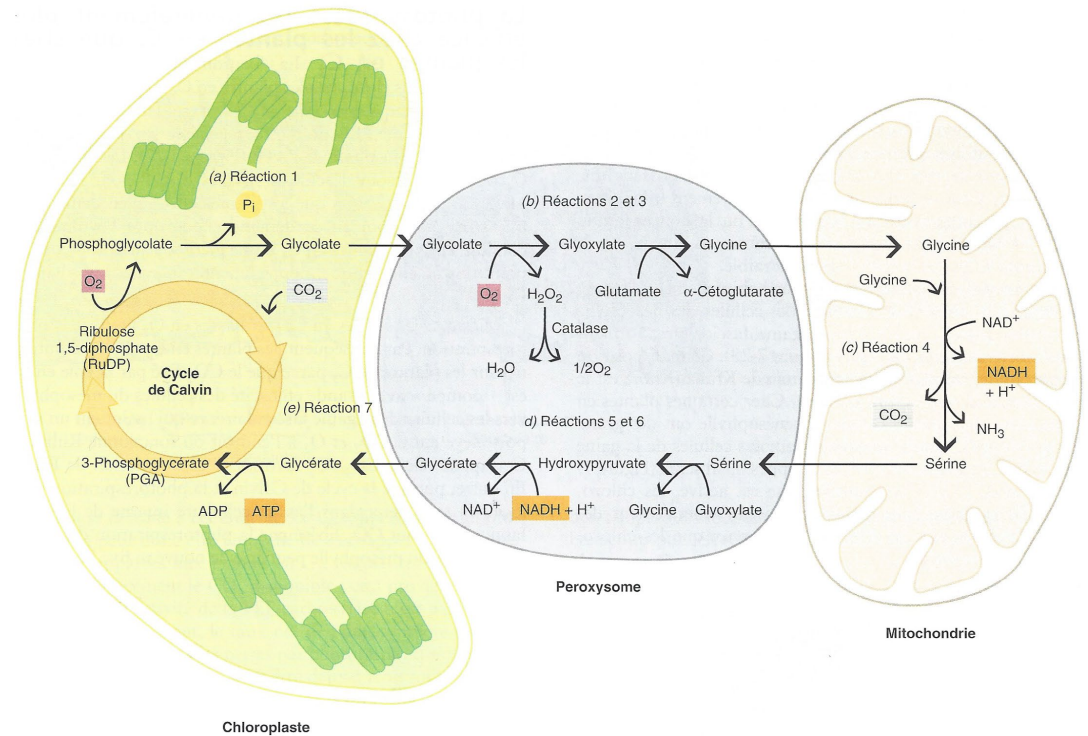


Schéma simplifié de la voie du glycolate ou voie de Tolbert.

Ce métabolisme implique trois compartiments cellulaires, le chloroplaste, le peroxyosome et la mitochondrie et de nombreux échanges de métabolites entre ces compartiments. Au cours du déroulement de ce cycle, deux molécules de glycolate sont métabolisées en une molécule de phosphoglycérate (PGA) avec consommation de O_2 et libération de CO_2 .

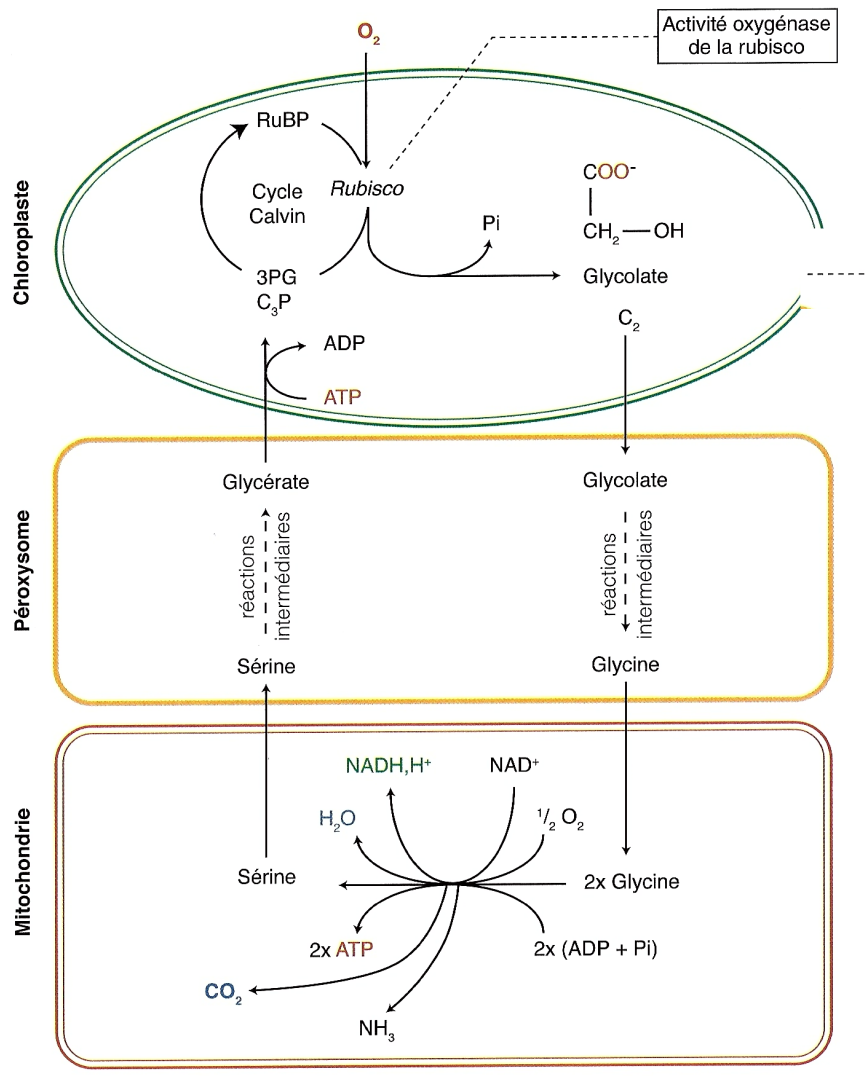
▲ FIGURE 61. La photorespiration ou voie du glycolate. D'après MOROT-GAUDRY *et al.* (2009)



Récupération du phosphoglycolate On voit ici la voie permettant la récupération du phosphoglycolate formé durant la photorespiration, par conversion en sérine, puis en 3-phosphoglycérate (PGA), qui rentre dans le cycle de Calvin. (a) Réaction 1 : Le phosphoglycolate est déphosphorylé dans les chloroplastes et produit le glycolate. (b) Réactions 2 et 3 : Dans les peroxyosomes, le glycolate est phosphorylé en PGA, qui rejoint le cycle de Calvin. L'oxygène est consommé à deux endroits au cours de la photorespiration, une fois dans le chloroplaste (l'activité oxygénase de Rubisco) et une fois dans le peroxyosome (oxydation du glycolate en glyoxylate). Le CO_2 est libéré à un endroit dans la mitochondrie (condensation de deux molécules de glycine en une molécule de sérine).

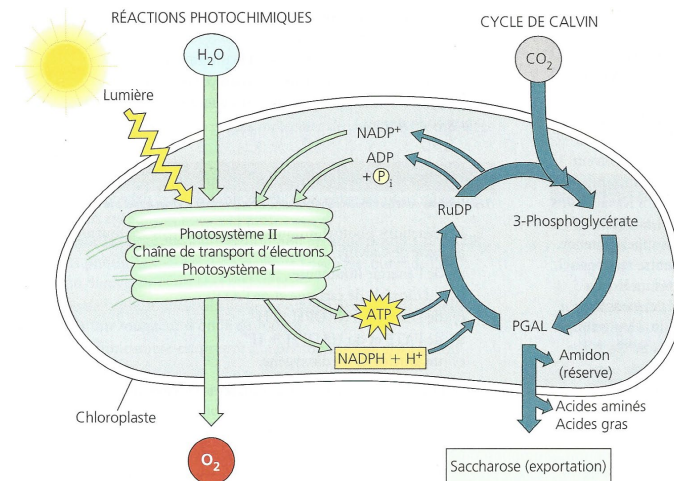
(d) Réactions 5 et 6 : Dans les peroxyosomes, la sérine est transaminée en hydroxypyruvate, qui est ensuite réduit en glycérate. Le glycérate entre ensuite dans les chloroplastes. (e) Réaction 7 : Le glycérate est phosphorylé en PGA, qui rejoint le cycle de Calvin. L'oxygène est consommé à deux endroits au cours de la photorespiration, une fois dans le chloroplaste (l'activité oxygénase de Rubisco) et une fois dans le peroxyosome (oxydation du glycolate en glyoxylate). Le CO_2 est libéré à un endroit dans la mitochondrie (condensation de deux molécules de glycine en une molécule de sérine).

▲ FIGURE 62. La photorespiration ou voie du glycolate. D'après RAVEN *et al.* (2007)



▲ FIGURE 63. La photorespiration ou voie du glycolate : une vision simplifiée.
D'après SEGARRA, PIÈTRE *et al.* (2023)

5. Vision synthétique de la photosynthèse et couplage des phases photochimique et chimique



Les réactions photochimiques :

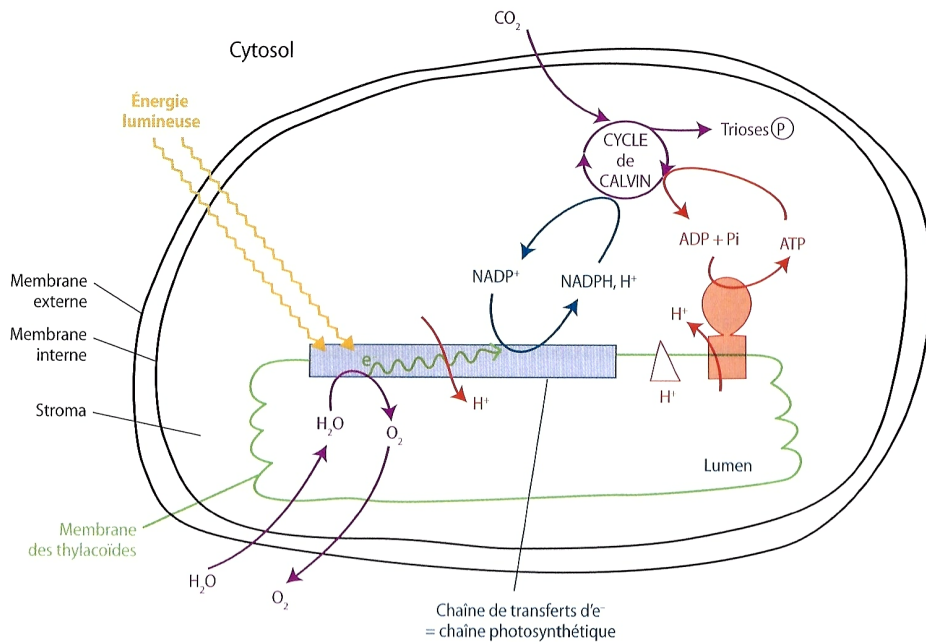
- sont réalisées par des molécules situées dans la membrane des thylakoïdes
- convertissent l'énergie lumineuse en l'énergie chimique de l'ATP et du NADPH + H⁺
- scindent l'eau et libèrent le dioxygène dans l'atmosphère

Les réactions du cycle de Calvin :

- se déroulent dans le stroma
- utilisent l'ATP et le NADPH + H⁺ pour convertir le CO₂ en PGAL
- retournent l'ADP, le phosphate inorganique et le NADP⁺ aux réactions photochimiques

Résumé de la photosynthèse.
Ce diagramme présente les produits et les réactifs principaux des réactions photochimiques et de celles du cycle de Calvin à mesure qu'elles se déroulent dans les chloroplastes. La bonne marche de l'opération repose sur l'intégrité structurale des chloroplastes et de leurs membranes. Les enzymes situées dans les chloroplastes et dans le cytosol convertissent le phosphoglycaldéhyde (PGAL), le produit direct du cycle de Calvin, en plusieurs autres composés organiques.

▲ FIGURE 64. Résumé de la photosynthèse en C₃. D'après CAMPBELL & REECE (2004)



La vue d'ensemble de la photosynthèse des cellules chlorophylliennes.

▲ FIGURE 65. Résumé de la photosynthèse en C3. D'après DAUTEL *et al.* (2021)

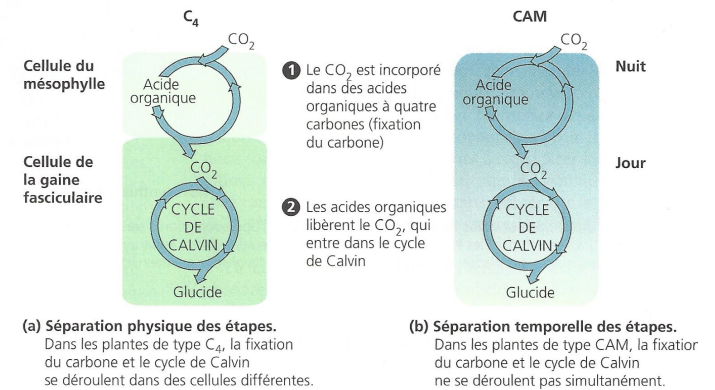
C. Des modalités particulières de fixation du CO₂ chez les plantes à photosynthèse en C₄ et photosynthèse de type CAM [pour information]

Comparaison entre la photosynthèse en C₄ et le métabolisme acide crassulacéen (CAM). Les deux adaptations se caractérisent par ① une fixation du CO₂ dans des acides organiques, suivie ② d'un transfert du CO₂ au cycle de Calvin. La photosynthèse en C₄ et le métabolisme acide crassulacéen représentent deux solutions au problème posé, en milieu aride, par la poursuite de la photosynthèse alors que les stomates sont partiellement ou complètement fermés.



Canne à sucre (*Saccharum officinarum*)

Ananas (*Ananas comosus*)



▲ FIGURE 66. Photosynthèse en C₄ et photosynthèse de type CAM [pour information]. D'après PEYCRU *et al.* (2013)

Et que deviennent les trioses phosphates ?

Vous le découvrirez dans le [chapitre suivant \(chapitre 10\)](#).

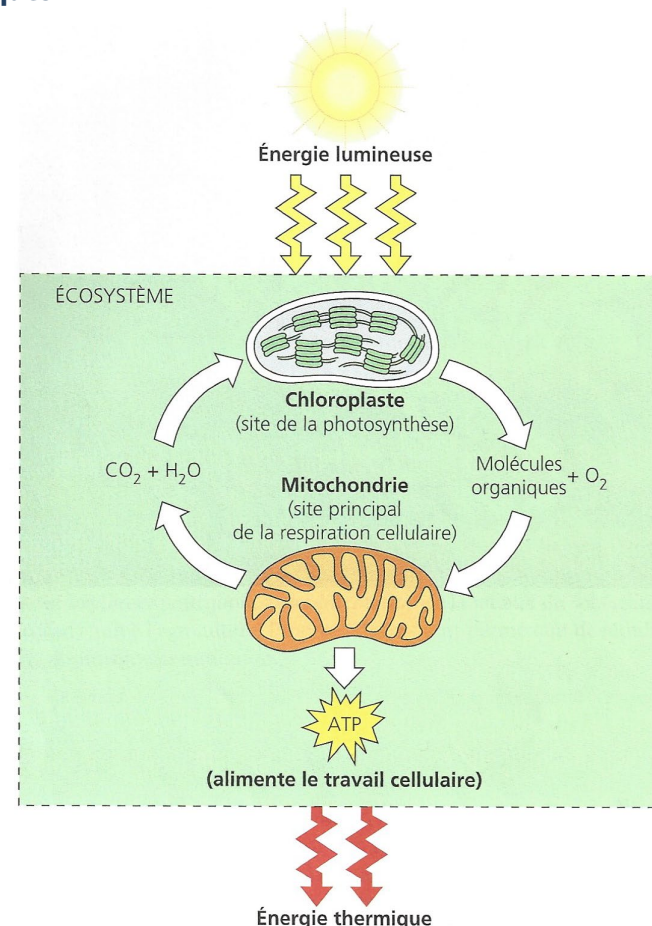
▼ **TABLEAU VI. Bilan comparatif des plantes en C3 et C4.**
D'après MEYER *et al.* (2008) (en bas).

Comparaison d'Angiospermes C3, C4 et CAM

Les chiffres indiqués sont des ordres de grandeur pour des végétaux herbacés.

	C3	C4	CAM
Milieu de vie	Ubiquiste	Milieu chaud en toutes saisons et lumineux	Désert chaud Désert salé Forêt tropicale (épiphytes)
% du nombre d'espèces	85 %	5 %	10 %
Exemples	blé (<i>Triticum aestivum</i>)	maïs (<i>Zea mays</i>)	cactus (<i>Cereus giganteus</i>)
Particularité de la photosynthèse	Les réactions sont simultanées le jour dans un seul type de cellule	Les réactions sont simultanées le jour, mais réparties dans 2 types de cellule : séparation spatiale	Les réactions ont lieu le jour puis la nuit, dans la même cellule : séparation temporelle
Premier produit de la photosynthèse <i>Plutôt : premier composé produit après fixation du CO₂</i>	APG (C3)	Malate (C4)	APG (C3) le jour Malate (C4) la nuit
Photosynthèse maximale (μmol CO ₂ .m ⁻² .s ⁻¹)	30	50	10
Optimum thermique de la photosynthèse (°C)	25	35	35 le jour 15 la nuit
Saturation lumineuse de la photosynthèse (μmol photon.m ⁻² .s ⁻¹)	1 000	> 1 500	> 1 500
Photorespiration	Oui	Non	Non
Production de matière sèche	Moyenne	Élevée	Faible
Stratégie	Activité moyenne sur une large gamme de conditions climatiques	Haute performance en condition chaude et lumineuse, humide ou sèche	Résistance en condition de sécheresse extrême

D. Importance écosystémique de la photosynthèse : quelques remarques



Flux de l'énergie et recyclage chimique dans les écosystèmes.

Les mitochondries des cellules eucaryotes utilisent les molécules organiques et le dioxygène issus de la photosynthèse pour la respiration aérobie. La respiration extrait l'énergie emmagasinée dans les molécules organiques pour produire de l'ATP, la substance qui alimente la majeure partie du travail cellulaire. Les déchets de la respiration, soit le dioxyde de carbone et l'eau, sont justement les matières premières de la photosynthèse, qui se fait dans les chloroplastes. On voit donc que les substances chimiques nécessaires à la vie se recyclent. L'énergie, elle, ne se recycle pas : elle entre dans un écosystème sous forme de lumière solaire et en sort sous forme de chaleur.

▲ **FIGURE 67. Importance écosystémique de la photosynthèse.**
D'après CAMPBELL & REECE (2004)

III. Le métabolisme autotrophe de *Nitrobacter*, Bactérie nitratante puisant dans le milieu énergie chimique et matière minérale

Capacités exigibles

- ✓ **Schématiser** l'organisation fonctionnelle de la chaîne de transfert d'électrons d'une bactérie nitratante (*Nitrobacter*).
- ✓ **Expliquer** le modèle de la chaîne de transfert des électrons chez les organismes chimiolithotrophes en utilisant les variations de potentiel d'oxydoréduction ($\Delta E'$) et d'enthalpie libre de réaction ($\Delta_r G'$).
- ✓ **Comparer** l'organisation fonctionnelle d'un thylakoïde et d'une membrane plasmique de bactérie nitratante.

A. La nitratisation, un processus qui s'inscrit dans le cycle de l'azote

Les cycles biogéochimiques et notamment le cycle de l'azote seront traités en détail en BCPST2

1. Un cycle de l'azote simplifié

a. Un cycle largement dû à des réactions d'oxydoréduction

▼ TABLEAU VII. Principaux composés du cycle de l'azote. D'après MADIGAN & MARTINKO (2007).

	Composé	Niveau d'oxydation	
Composé très réduit	N organique (R-NH ₂)	- 3	Composé peu oxydé
	Ammoniac (NH ₃)	- 3	
	Azote gazeux (N ₂)	0	
Composé peu réduit	Oxyde nitreux (N ₂ O)	+ 1 (moyenne par N)	Composé très oxydé
	Oxyde d'azote (NO)	+ 2	
	Nitrite (NO ₂ ⁻)	+ 3	
	Dioxyde d'azote (NO ₂)	+ 4	
	Nitrate (NO ₃ ⁻)	+ 5	

Bilan (adapté du programme)

- ✓ L'hydrolyse de l'ATP fournit l'énergie nécessaire au fonctionnement du cycle et la régénération du ribulose 1,5 bisphosphate (RuBP). La RubisCO est une enzyme clef permettant l'incorporation du CO₂.
- ✓ Dans le cas de la cellule végétale chlorophyllienne, l'énergie utilisée dans le cycle de CALVIN provient de la conversion de l'énergie lumineuse (phototrophie). Les électrons nécessaires à la réduction proviennent d'une molécule minérale, l'eau (lithotrophie).
- ✓ La membrane des thylakoïdes contient des photosystèmes qui font partie d'une chaîne de transport d'électrons convertissant l'énergie lumineuse en énergie potentielle chimique.
- ✓ La RubisCO est une enzyme oligomérique michaelienne à activité carboxylase (cycle de CALVIN) et oxygénase (photorespiration).

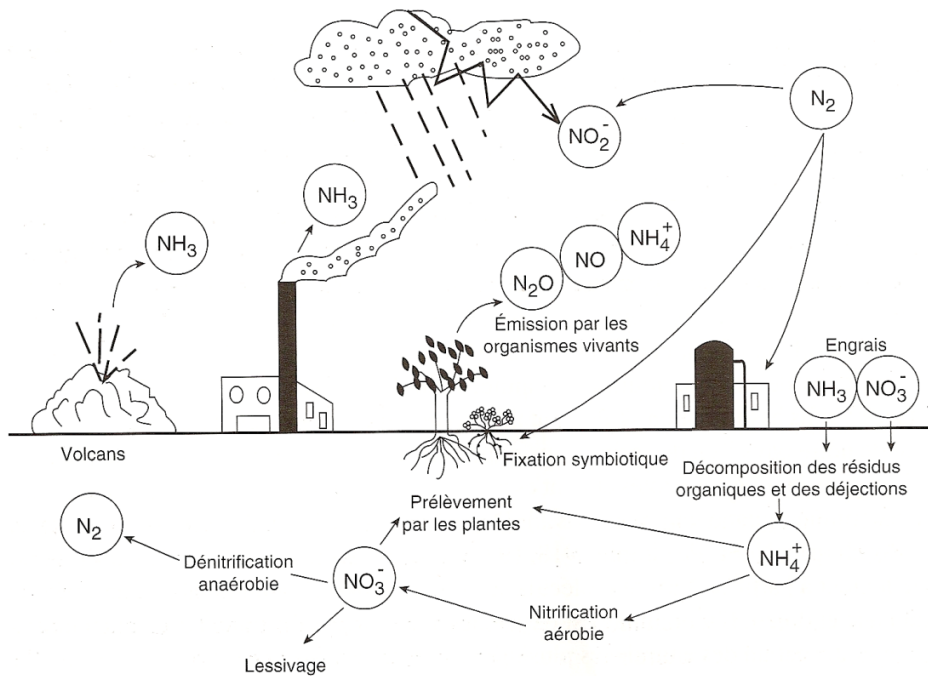


FIGURE 68. Cycle de l'azote. D'après MOROT-GAUDRY et al. (1997).

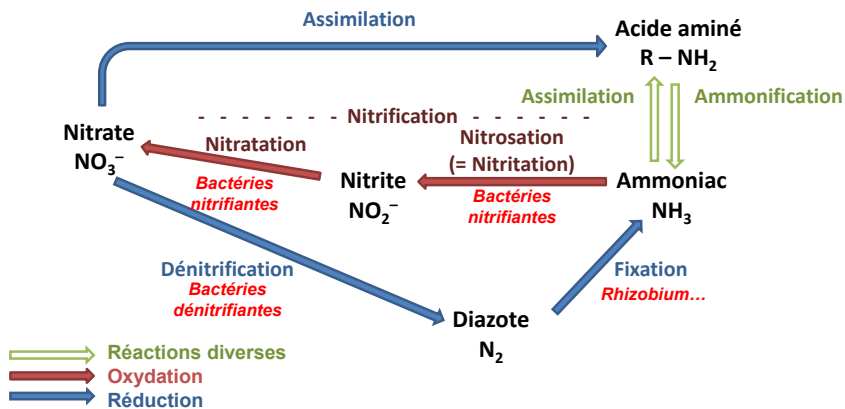


FIGURE 69. Cycle de l'azote simplifié. Original 2009.

b. Transferts et réservoirs du cycle de l'azote

2. La nitratisation, une étape de la nitrification (= nitrosation + nitratisation) dans les sols ou les milieux aquatiques

Nitrosation	Bactéries <i>g. Nitrosomonas</i>	
	$NH_4^+ + 3/2 O_2 \longrightarrow NO_2^- + H_2O + 2H^+$	
	Ammonium	Nitrite
	Nombre d'oxydation -3	+3
Nitratisation	Bactéries <i>g. Nitrobacter</i>	
	$NO_2^- + 1/2 O_2 \xrightarrow{\text{Nitrite oxydase}} NO_3^-$	
	Nitrite	Nitrate
	Nombre d'oxydation +3	+5

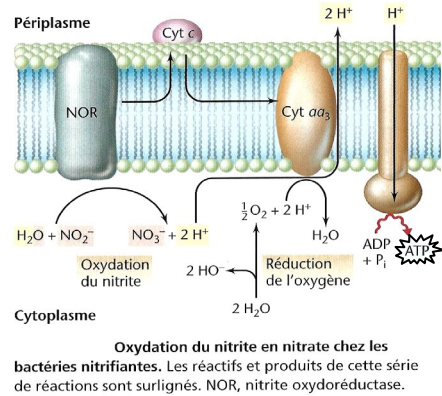
Nitrification réalisée uniquement par des *bactéries chimio-lithotrophes*

FIGURE 70. Panorama de la nitrification. D'après SEGARRA, PIÈTRE et al. (2023), adapté.

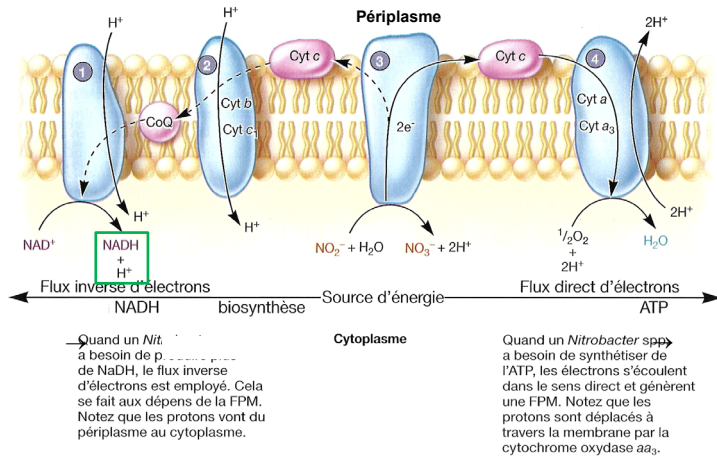
B. Modalités et mécanismes de la nitratisation chez Nitrobacter

a. Une chaîne de transport d'électrons qui produit, d'un côté de l'ATP, et de l'autre du pouvoir réducteur (NADH, H⁺)

- α. Une oxydation des nitrites en nitrates qui libère des électrons et de l'énergie
- β. Devenir 1 : des électrons qui finissent acceptés par le dioxygène (O₂ réduit en eau H₂O par la cytochrome oxydase), assurant la mise en place d'un gradient de protons assurant le fonctionnement des ATP synthases
- γ. Devenir 2 : des électrons qui finissent acceptés par le NAD⁺ réduit en NADH, H⁺ dans le cadre d'une chaîne électronique « inversée »

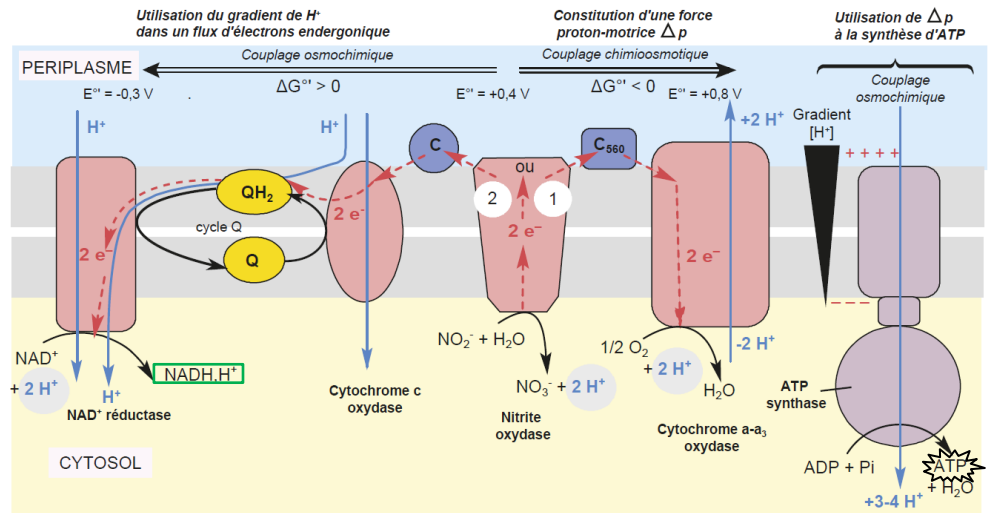


▲ FIGURE 71. **Chaîne de transports d'électrons chez Nitrobacter.** D'après MADIGAN & MARTINKO (2007).



Flux d'électrons dans les chaînes de transfert chez Nitrobacter spp. *Nitrobacter* oxyde le nitrite et effectue un transfert normal d'électrons pour générer une force proton-motrice et synthétiser de l'ATP. C'est la branche droite du schéma. Une partie de la force proton-motrice sert aussi pour forcer les électrons à remonter le gradient de potentiel de réduction, du nitrite au NAD^+ (branche gauche). Le cytochrome c (Cyt c), le coenzyme Q (CoQ), et quatre complexes protéiques constituent cette CTE. Ce sont la NAD-ubiquinone oxydoréductase (1), l'ubiquinol-cytochrome c oxydoréductase (2), la nitrite oxydase (3) et la cytochrome aa_3 oxydase (4).

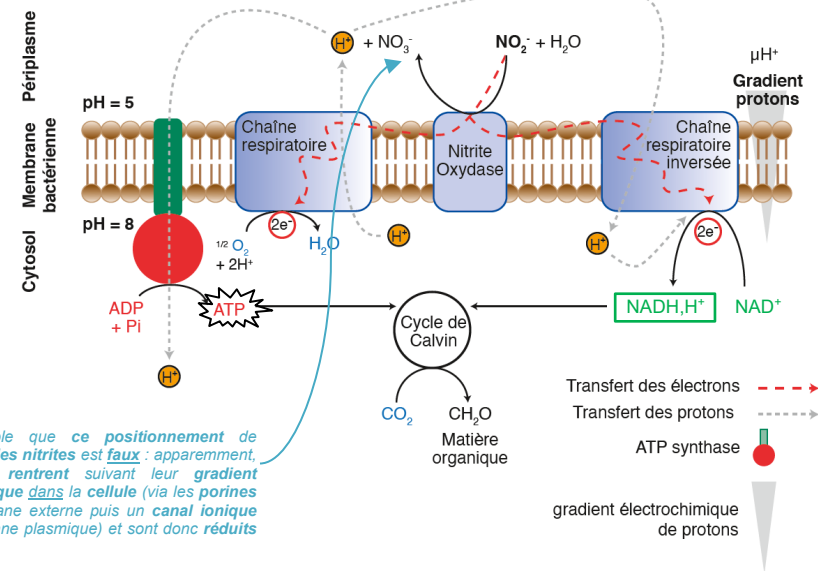
▲ FIGURE 72. **Chaîne de transports d'électrons chez Nitrobacter.** D'après WILLEY et al. (2018).



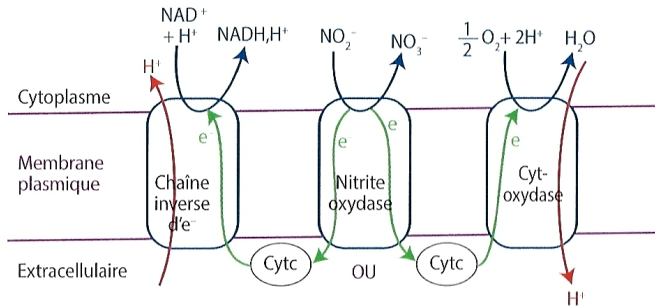
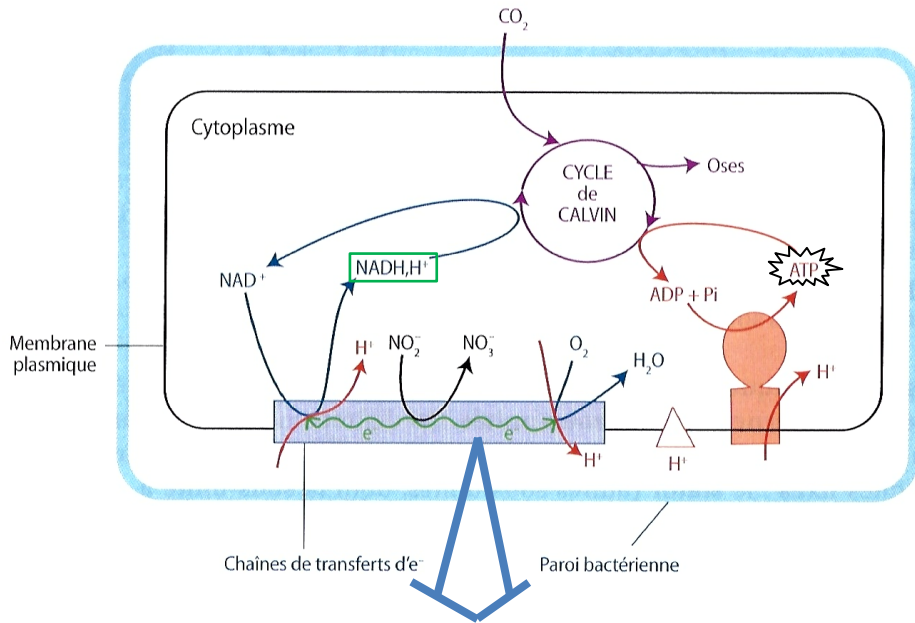
Chaîne de transport d'électrons de *Nitrobacter*.

Q : ubiquinone ; C : cytochrome ; C₅₆₀ : cytochrome 560. Les protons réactionnels sont sur fond gris.

▲ FIGURE 73. **Chaîne de transports d'électrons chez Nitrobacter.** D'après PERRIER, BEAUX et al. (2021).

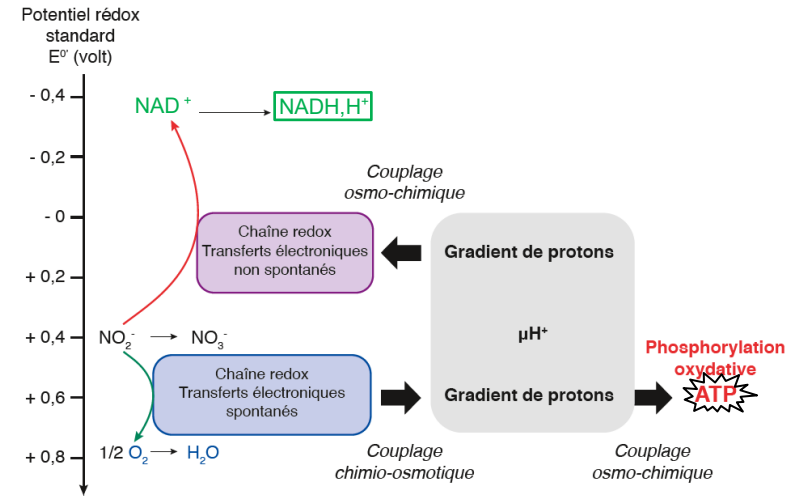


▲ FIGURE 74. **Chimiosynthèse avec un focus sur la chaîne de transports d'électrons chez Nitrobacter.** D'après SEGARRA, PIÈTRE et al. (2023), corrigé.



▲ FIGURE 75. **Chimiosynthèse et focus sur la chaîne de transports d'électrons simplifiée chez *Nitrobacter*.** D'après DAUTEL *et al.* (2021).

b. Aspects énergétiques



En vert, sens de déplacement des électrons thermodynamiquement favorisé, en rouge, sens de déplacement des électrons thermodynamiquement défavorisé.

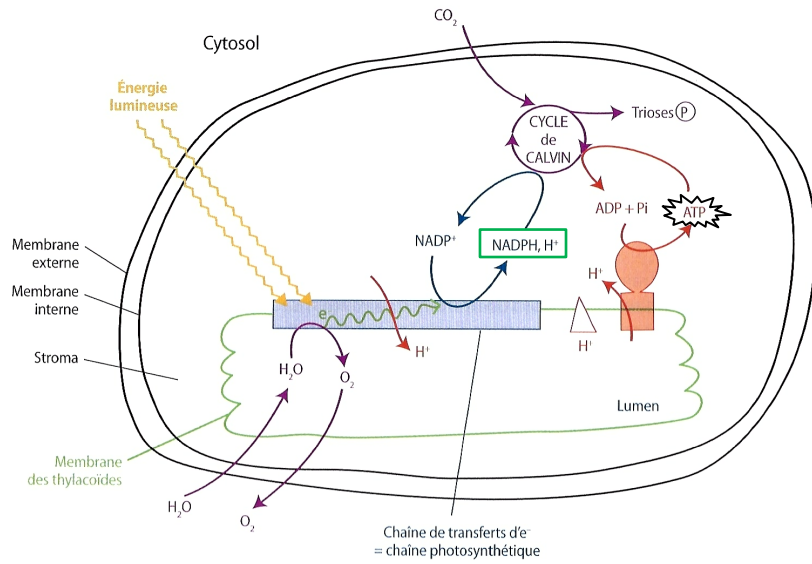
▲ FIGURE 76. **Diagramme énergétique très simplifié de la chaîne de transfert d'électrons chez *Nitrobacter*.** D'après SEGARRA, PIÈTRE *et al.* (2023), corrigé.

c. De l'ATP et du pouvoir réducteur essentiels au cycle de CALVIN où le CO₂ est réduit en matière organique

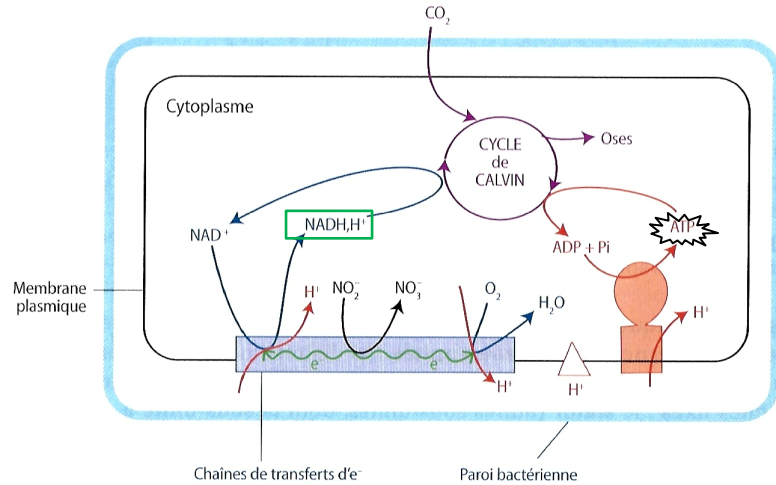
Bilan (adapté du programme)

✓ Dans le cas des **bactéries nitrifiantes** comme *Nitrobacter*, l'énergie est **apportée** par **conversion d'énergie potentielle chimique (chimiotrophie)**. Les **électrons** nécessaires à la **réduction** proviennent d'une **molécule minérale**, l'**ion nitrite (lithotrophie)**.

C. Comparaison de la photo-autotrophie des Angiospermes et la chimio-autotrophie de *Nitroba*

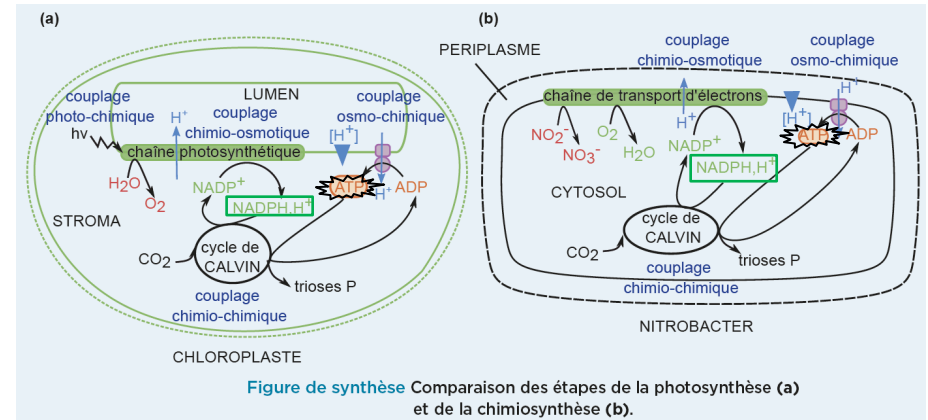


Photosynthèse des Angiospermes

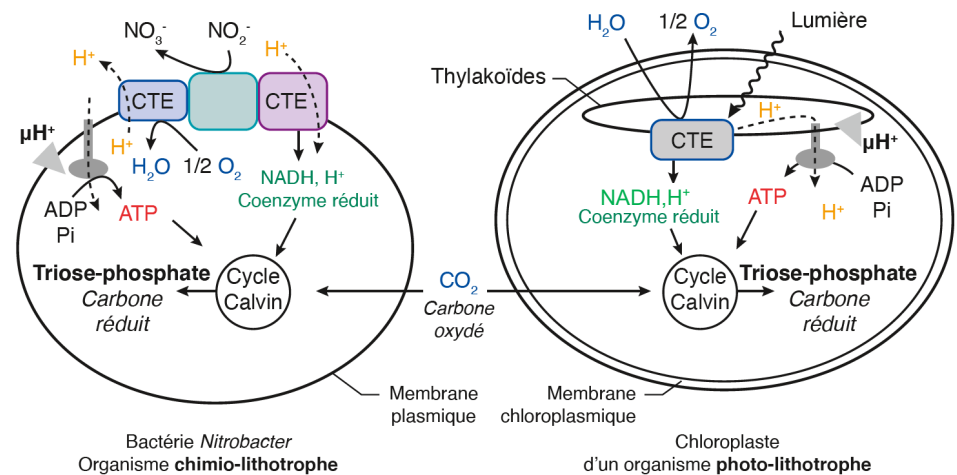


Chimiosynthèse de *Nitroba*

▲ FIGURE 77. **Comparaison de la photosynthèse d'une Angiosperme et de la chimiosynthèse *Nitroba* : métabolismes simplifiés.** D'après DAUTEL *et al.* (2021).



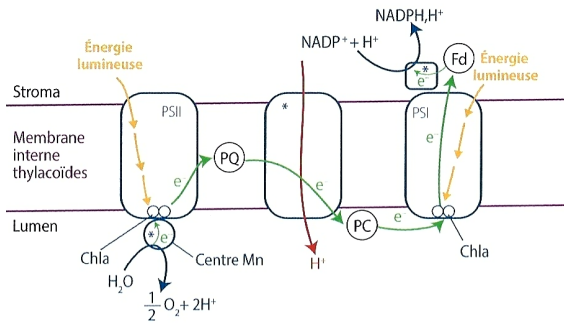
▲ FIGURE 78. **Comparaison de la photosynthèse d'une Angiosperme et de la chimiosynthèse *Nitroba* : métabolismes simplifiés.** D'après DAUTEL *et al.* (2021).



CTE en bleu: chaîne de transfert exergonique des électrons responsable de la respiration et de la genèse du gradient de protons.
 CTE en violet: chaîne de transfert endergonique des électrons responsable de la formation du pouvoir réducteur.
 CTE en gris: chaîne de transfert des électrons allant du PSII au PSI, responsable de la genèse du gradient de protons et de la formation du pouvoir réducteur.

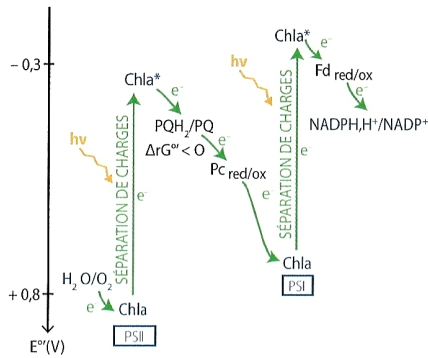
▲ FIGURE 79. **Comparaison de la photosynthèse d'une Angiosperme et de la chimiosynthèse *Nitroba* : métabolismes simplifiés.** D'après SEGARRA, PIÈTRE *et al.* (2023).

CHAÎNE DE TRANSFERTS D'ÉLECTRONS

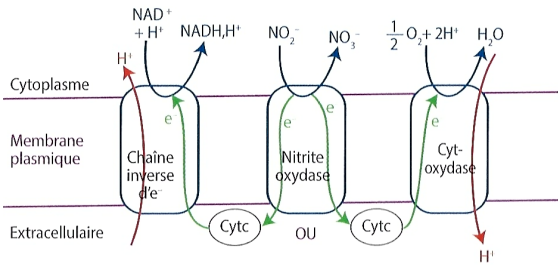


Photosynthèse des Angiospermes

POTENTIELS REDOX DANS LA CHAÎNE PHOTOSYNTHÉTIQUE

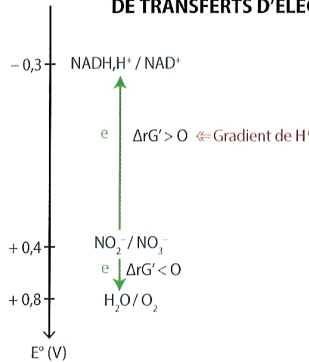


CHAÎNE DE TRANSFERTS D'ÉLECTRONS BIDIRECTIONNELLE



Chimiosynthèse de Nitrobacter

POTENTIEL REDOX DE LA CHAÎNE DE TRANSFERTS D'ÉLECTRONS

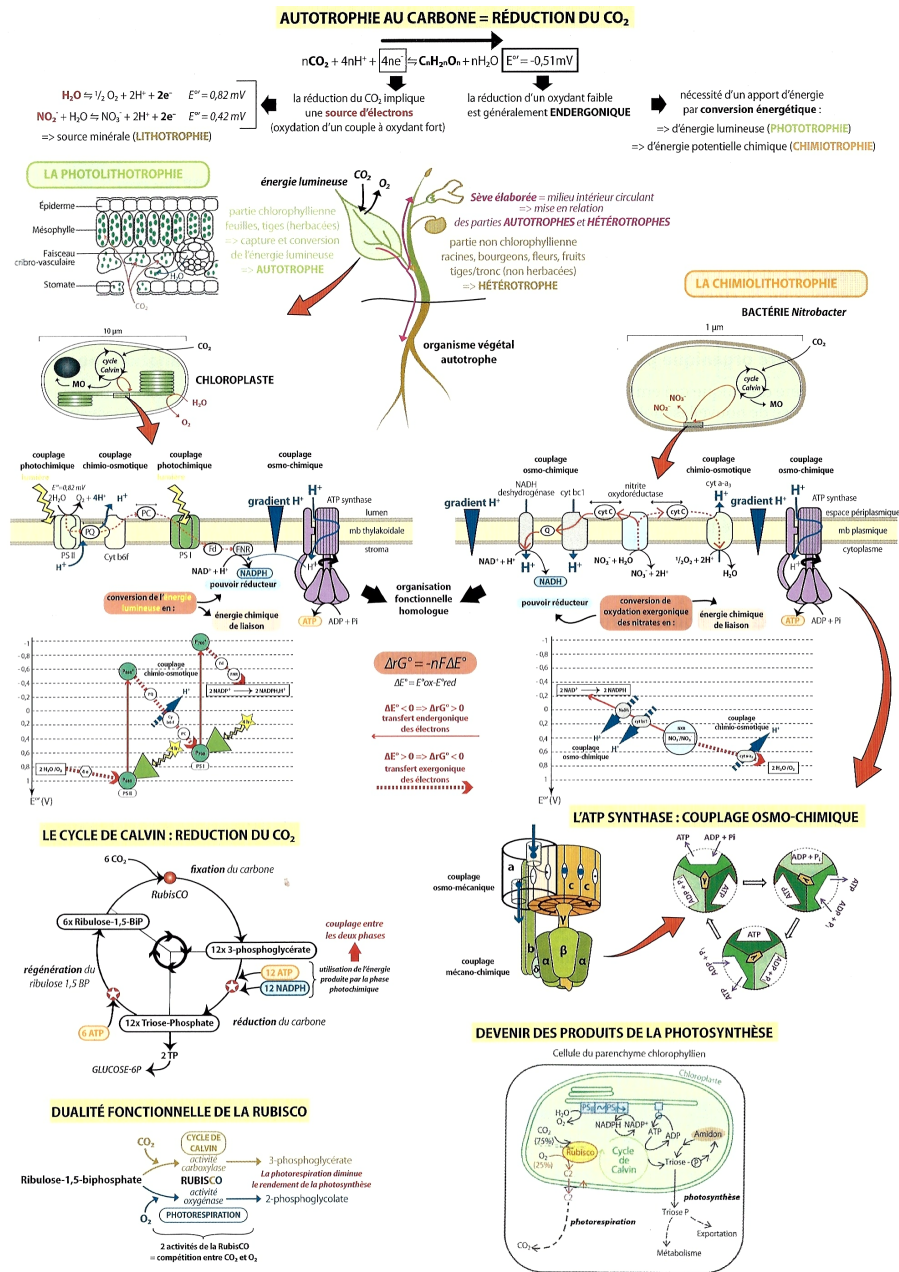


▼ **TABLEAU VIII. Comparaison de deux autotrophies : la photosynthèse chez les Angiospermes et la chimiosynthèse chez Nitrobacter. Original 2023.**

Caractéristique	Photosynthèse (Angiospermes)	Chimiosynthèse (Nitrobacter)
Localisation du cycle de CALVIN	Stroma chloroplastique	Cytoplasme
Source de carbone inorganique	Dioxyde de carbone CO ₂	
Localisation de la CTE	Membrane thylakoïdienne	Membrane plasmique
Donneur initial d'électrons = source d'électrons	Eau H ₂ O (red) → oxydée en dioxygène O ₂ par le complexe Z (= OEC)	Nitrites NO ₂ ⁻ (red) → oxydés en nitrates NO ₃ ⁻ par la nitrite oxydase
Accepteur primaire d'électrons	PSI (P700) : chlorophylle A ₀ PSII : phéophytine	Cytochrome (c ₅₅₀ ou c)
Accepteur final d'électrons	NADP ⁺ (ox) → réduit en NADPH, H ⁺ par la NADP ⁺ réductase	Dioxygène O ₂ (ox) → réduit en eau H ₂ O par la cytochrome oxydase ou NAD ⁺ (ox) → réduit en NADH, H ⁺ par la NAD ⁺ réductase
Source d'énergie	Énergie photonique : Lumière	Énergie chimique : Oxydation des nitrites

▲ **FIGURE 80. Comparaison des chaînes de transfert d'électrons (CTE) d'une Angiosperme et de Nitrobacter, et de leurs diagrammes énergétiques respectifs en versions simplifiées.**

D'après DAUTEL *et al.* (2021).



▲ FIGURE 81. **L'autotrophie au carbone : vue d'ensemble.**
 D'après SAINTPIERRE, BORDI *et al.* (2021).

IV. Un prélèvement de matière organique déjà existante dans le milieu : l'hétérotrophie

Capacité exigible

✓ Argumenter l'approvisionnement des cellules en matière organique en prenant l'exemple du glucose chez les Mammifères.

A. Deux modalités principales : l'absorbtrophie (ex. 'champignons') et la phagotrophie (ex. Métazoaires)

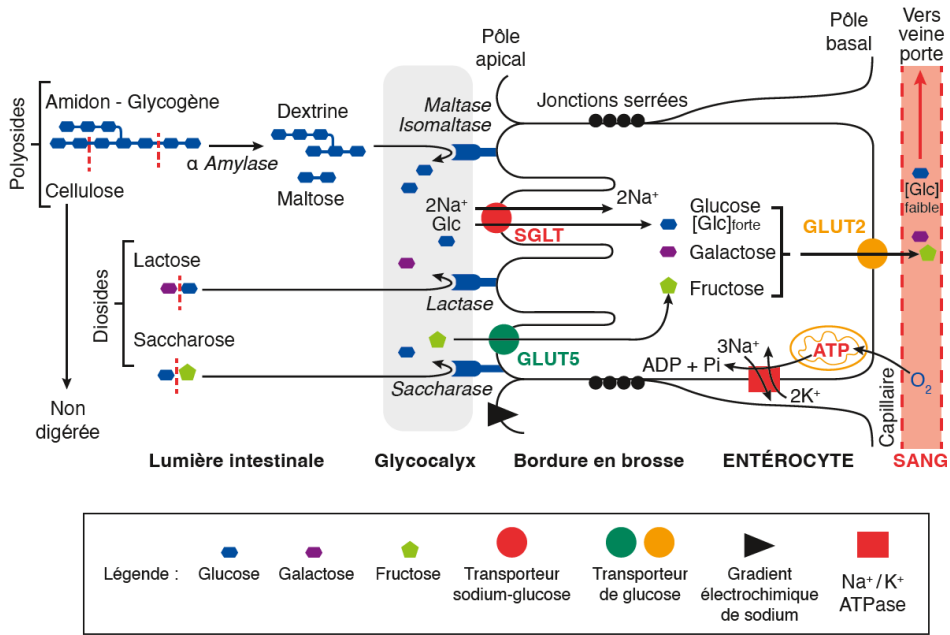
B. L'exemple des Mammifères, organismes phagotrophes

On reverra ici le cours sur la Vache (chapitre 1) ainsi que le cours de BCPST2 sur la circulation. Il ne s'agit pas ici d'ajouter de notions nouvelles, comme le stipule clairement le programme.

1. Une matière organique simplifiée par la digestion à partir de portions d'organismes vivants ingérés

2. Une matière organique typiquement prélevée au niveau intestinal (ou au niveau d'autres tronçons) après digestion

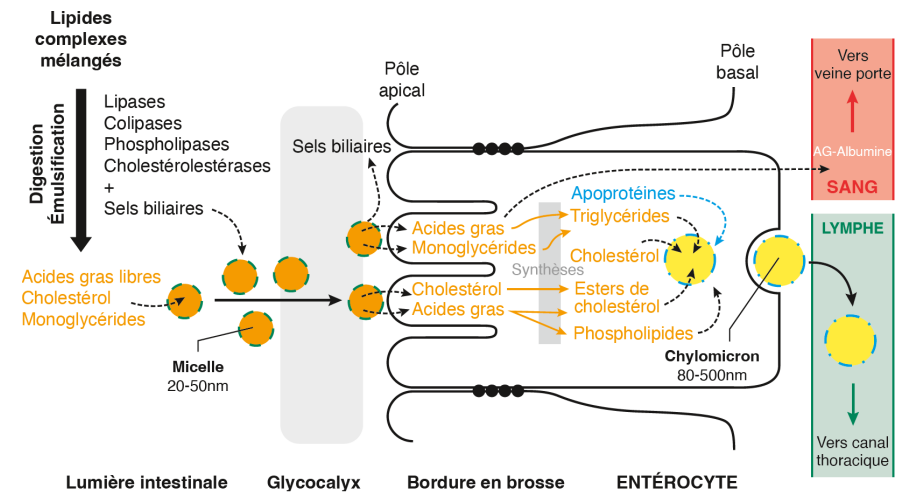
Les exemples de digestion / absorption des acides aminés et lipides traités par SEGARRA, PIÈTRE *et al.* (2023) me semble hors programme. Les personnes qui seraient désireuses de lire un traitement complet de la digestion chez les Mammifères peuvent lire mon chapitre d'ATS Bio sur la digestion (chapitre 15).



▲ **FIGURE 82. Digestion et absorption des glucides : une vision simple.**
 Seul l'exemple du glucose est exigible.
 D'après SEGARRA, PIÈTRE *et al.* (2023).

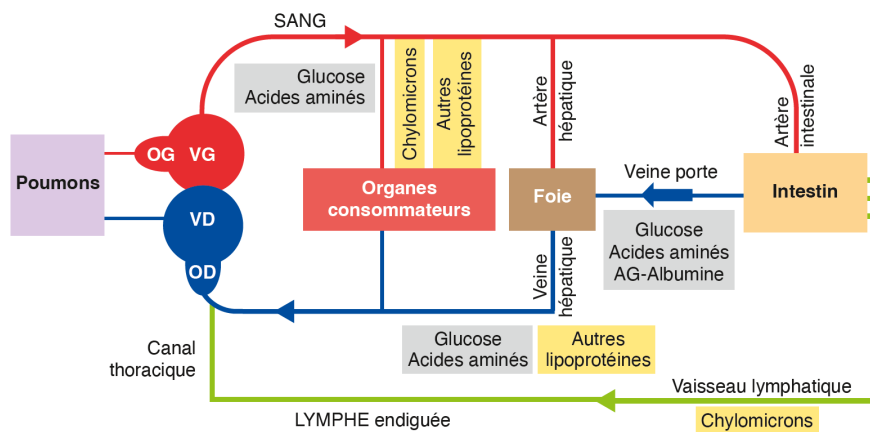
D'après SEGARRA, PIÈTRE *et al.* (2023).

Pour mémoire : petit rappel sur la digestion des lipides, leur absorption et leur charge dans les liquides circulants :



▲ **FIGURE 84. Digestion et absorption des lipides : une vision simple.**
 D'après SEGARRA, PIÈTRE *et al.* (2023).

3. Une matière organique transportée par les systèmes circulatoires (sanguin et lymphatique)



▲ **FIGURE 83. Transport des nutriments chez les Mammifères.**

Encadré F Les lipoprotéines circulantes

Pour information – d'après SEGARRA, PIÈTRE et al. (2023)

Les lipoprotéines sont des complexes moléculaires sphériques adaptés au transport en milieu aqueux comme le sang et dont la composition en lipides et apoprotéines détermine plusieurs classes de densité et de taille variable.

Classe de lipoprotéines	Chylomicron	VLDL	LDL
Composition			
Densité	< 0,95	0,95-1	1,01-1,06
Taille	80-500 nm	50 nm	20 nm
Lipides principalement transportés	Véhicule les TG	Véhicule les TG esters de cholestérol	Véhicule des esters de cholestérol et cholestérol
Rôle pour les cellules consommatrices	Source d'AG longue chaîne	Sources d'AG longue chaîne	Source de cholestérol

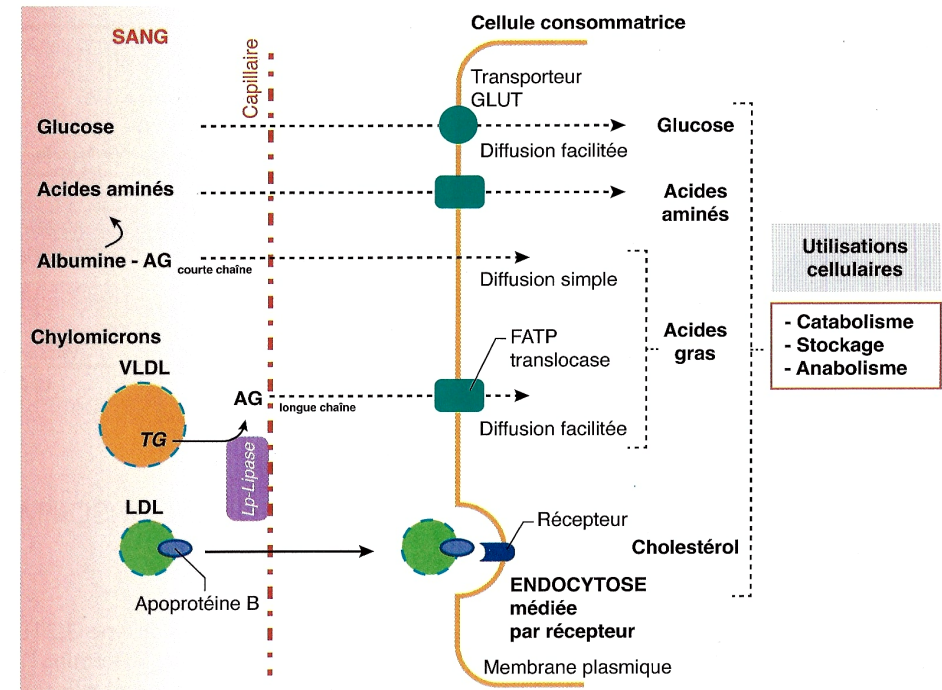
AG: acide gras; TG: triglycéride; LDL: low density lipoprotein; VLDL: very low density lipoprotein.

Les **chylomicrons** vont, dans les capillaires sanguins des organes consommateurs (muscle, lobules adipeux) et sous l'action d'une lipoprotéine lipase, subir une hydrolyse de leur triglycérides et libérer des acides gras à longue chaîne qui seront métabolisés par les cellules musculaires et adipocytes. Les résidus de chylomicrons finissent par retourner au foie.

Le foie forme ensuite des lipoprotéines, de type **VLDL**, qu'il secrète dans la circulation sanguine. Les VLDL vont à leur tour subir la même action enzymatique que les chylomicrons et approvisionner en acides gras les cellules consommatrices.

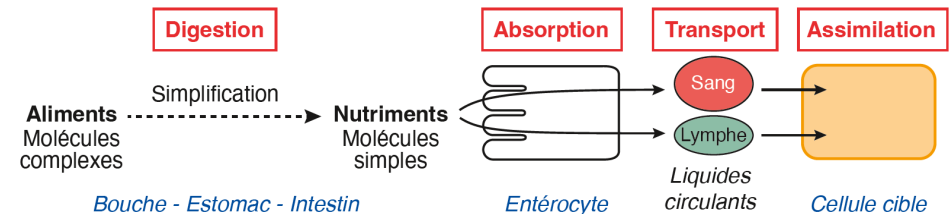
Les lipoprotéines de type **LDL** sont reconnues par toutes les cellules de l'organisme, subissent une endocytose par récepteur et fournissent le cholestérol aux cellules.

4. Une matière organique entrant dans les cellules consommatrices par des transporteurs spécifiques (ou une endocytose)



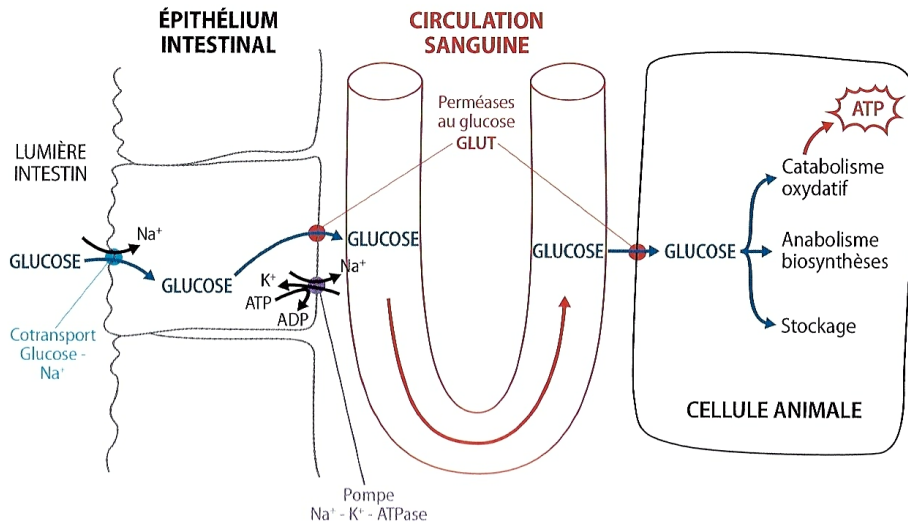
▲ FIGURE 84. Entrée des nutriments dans les cellules consommatrices. D'après SEGARRA, PIÈTRE et al. (2023).

5. Bilan



▲ FIGURE 85. Approvisionnement en matière organique chez les Mammifères : vue d'ensemble. D'après SEGARRA, PIÈTRE et al. (2023).

Pour faire une fiche de révision : quelques pistes



L'approvisionnement des cellules animales en matière organique, exemple du glucose chez un Métazoaire.

▲ FIGURE 86. Approvisionnement en glucose les Mammifères : vue d'ensemble.
D'après SEGARRA, PIÈTRE *et al.* (2021).

Il est conseillé de maîtriser les **grandes lignes du plan**

Le **plan** ne doit pas être perçu comme un carcan figé, ou comme un modèle de plan de dissertation à ré-utiliser en devoir, mais bien comme un **outil d'apprentissage et de structuration des concepts importants**. Vous pouvez en recopier les grandes lignes ou annexer le plan du polycopié directement.

Il est conseillé de réaliser un **lexique des principales définitions**.

Il est conseillé de reproduire les **schémas (et tableaux) majeurs** :

Liste indicative.

- **Structure du métabolisme**

- ° Exemples de **couplages** + principe d'un couplage
- ° Principe des trois **types trophiques** traités cette année
- ° **Coenzymes d'oxydoréduction**
- ° **ATP**
- ° Échelle de **potentiels d'hydrolyse**
- ° Modalités de **régénération de l'ATP**
- ° **ATP synthase** simplifiée
- ° Expérience de **JAGENDORF & URIBE**
- ° Rotation de la chaîne γ et synthèse d'ATP = fonctionnement séquentiel de **l'ATP synthase**
- ° Utilisations principales de **l'ATP**

- **Photosynthèse**

- ° **Corrélations trophiques** dans une Angiosperme
- ° **Expériences** simples : Élodée, ExAO, Pelagomium, expérience de HILL (° Graphes des **points de compensation / saturation**)
- ° **Chloroplaste**
- ° **Feuille**, CT de feuille
- ° **Spectre d'absorption** de quelques pigments
- ° **Spectre d'action** de la photosynthèse
- ° **Expérience d'ENGELMANN**
- ° **Pigments** (à simplifier)
- ° **Photosystèmes**
- ° **Effet EMERSON** (expérience)
- ° **Diagramme énergétique** de la **chaîne photosynthétique**
 - ° **Transfert acyclique** des électrons (« schéma en Z »)
 - ° **Transfert cyclique** des électrons
- ° **Chaîne photosynthétique** (en sachant placer les deux types de transferts d'électrons et l'établissement du gradient de H^+)
- ° **Expériences de CALVIN** : principe
- ° **Cycle de CALVIN** simplifié (principales molécules), avec billes pour le C
- ° Dualité **carboxylase-oxydase** de la **rubisco**
- ° **Photorespiration** (simplifiée)

- **Chimiosynthèse** chez Nitrobacter

- ° **Cycle de l'azote** simplifiée (cycle complet en **2^e année**)
- ° **Nitrification** et ses deux étapes
- ° **Chaîne chimiosynthétique (CTE)** de *Nitrobacter* + **métabolisme d'ensemble**
- ° **Diagramme énergétique** de la CTE de *Nitrobacter*
- ° **Comparaison** photosynthèse-chimiosynthèse

Bilan (adapté du programme)

- ✓ Les **cellules hétérotrophes** prélèvent directement la **matière organique** dans leur **environnement**.
- ✓ Ce **prélèvement** implique des **échanges transmembranaires** que ce soit au niveau des **cellules** constituant les **surfaces d'échange** avec le milieu ou au niveau des **cellules consommatrices**.
- ✓ Au sein d'un **organisme pluricellulaire**, un **fluide circulant** assure généralement le **transport des molécules** entre les différentes cellules.

- Hétérotrophie

- ° Digestion et absorption des entérocytaire des **glucides** à centrer sur le **glucose**
- ° Circulation des nutriments dans l'organisme
- (° Digestion et absorption des **lipides**)
- ° Entrée (surtout du **glucose**) dans les **cellules consommatrices**
- ° Vision d'ensemble (**bilan**) de l'apport en matière organique chez les Mammifères

Références

- ALBERTS, B., A. JOHNSON, J. LEWIS, M. RAFF, K. ROBERTS & P. WALTER (2004). *Biologie moléculaire de la cellule. Quatrième édition*. Traduction de la quatrième édition américaine (2002) par F. LE SUEUR-ALMOSNI. Flammarion, Paris. Première édition américaine 1983 (1986 1^{re} édition française).
- AUGÈRE, B. (2001). *Les enzymes, biocatalyseurs protéiques*. Ellipses, Paris.
- BAL, A., C. CALAMAND, C. COTTON, G. GOHAU, M. LE BELLÉGARD, C. MARCONIS, D. RICHARD, M. SEBBAH & C. TORTORA (1992). *Régulation. La régulation des fonctions*. Hachette, Paris.
- BAYNES, J. W. & M. H. DOMINICZAK (dir.) (2019). *Medical Biochemistry*. 5^e édition (1^{re} édition 1999). Elsevier, Amsterdam.
- BERGERON, J. (dir.), P. BEAUJARD, B. DAVID, A. HYON, I. BEDNAREK-MAÏTREPIERRE, D. MARGERIE, M. MARGERIE & O. MOUTAUX (2001). *Sciences de la Vie et de la Terre Première S*. Hatier, Paris.
- BERTHET, J. (2006). *Dictionnaire de Biologie*. De Boeck Université, Bruxelles (Belgique).
- BOUJARD, D. (dir.), B. ANSELME, C. CULLIN & C. RAGUÉNÉS-NICOL (2015). *Biologie cellulaire et moléculaire. Tout le cours en fiches. Licence. PACES. CAPES*. 2^e édition (1^{re} édition 2012). Dunod, Paris.
- BOUTIN, V., L. GERAY (dir.), H. CLAUCE, A. DENIS, A. PROUST & C. VILBERT (2022). *La Biologie en 2200 schémas*. De Boeck, Louvain-la-Neuve (B).
- BERG, I. A. (2011). Ecological Aspects of the Distribution of Different Autotrophic CO₂ Fixation Pathways. *Applied and Environmental Microbiology*, 77: 1925-1936. <https://doi.org/10.1128/AEM.02473-10>
- BERNARD, J.-J. (2002). *Bioénergétique cellulaire*. Ellipses, Paris.
- BREUIL, M. (2007). *Biologie 1^{re} année BCPST-véto*. Tec & Doc, Lavoisier, Paris.
- BREUIL, M. (2009). *Biologie 2^e année BCPST-véto*. Tec & Doc, Lavoisier, Paris.
- BUCHANAN, B. B., W. GRUISSEM & R. L. JONES (dir.) (2015). *Biochemistry and Molecular Biology of Plants*. Wiley, New York, USA – Blackwell, Oxford, UK, 2e edition (1e edition 2002).
- CAMPBELL, N. A. & J. B. REECE (2004). *Biologie*. De Boeck Université, Bruxelles, 2^e édition (1^{re} édition 1995).
- [CAMPBELL, N. A.], J. B. REECE, L. A. URY, M. L. CAIN, S. A. WASSERMAN, P. V. MINORSKY, R. B. JACKSON (2012). *Campbell Biologie*. Adaptation française J. FAUCHER & R. LACHAÏNE. Pearson, Paris (4e édition).
- DAUTEL, O. (dir.), A. PROUST, M. ALGRAIN, C. BORDI, A. HELME-GUIZON, F. SAINTPIERRE, M. VABRE & C. BOGGIO (2017). *Biologie Géologie BCPST 1^{re} année*. Vuibert, Paris.
- DAUTEL, O. (dir.), C. BORDI, F. SAINTPIERRE, M. ALGRAIN-PITAVY, M. QUERTINIEZ, A. PROUST, M. VABRE A. HELME-GUIZON & B. MOLLIER (2019). *Biologie Géologie BCPST 2^e année*. Vuibert, Paris.
- DAUTEL, O. (dir.), M. ALGRAIN-PITAVY, C. BORDI, A. HELME-GUIZON, B. MOLLIER, A. PROUST, M. QUERTINIEZ, F. SAINTPIERRE & M. VABRE (2021). *Prépas scientifiques BCPST 1^{re} année. Biologie Géologie. Tout-en-un*. Vuibert, Paris.
- DAUTEL, O. (dir.), M. ALGRAIN-PITAVY, C. BORDI, A. HELME-GUIZON, B. MOLLIER, A. PROUST, F. SAINTPIERRE & M. VABRE (2022). *Prépas scientifiques BCPST 2^e année. Biologie Géologie. Tout-en-un*. Vuibert, Paris.
- DELAIRE-ÉCHARD, S. & J.-M. BELLAMY (dir.), G. CAMUS, M. CHAIZE, C. CROQUELOIS, S. DE SINGLY, S. GASNE, C. HELMSTETTER, A. HERMIER, A.-S. HODOT, S. HURTREZ, C. LEGENT, M. MAINTIGNEUX, A.-C. MARTIN, C. MEILLAUD, C. NUSS, C. PALMIER, F. THIERRY, S. TRUFFAUT, A. YVET, C. CAUSSE & Y. KRAUSS (2019). *Sciences de la Vie et de la Terre. Planète SVT 1^{re} Spécialité. Programme 2019*. Hachette, Paris.
- DENÈUD, J., T. FERROIR, O. GUIPPONI, H. MOREAU, M. PAULHIAC-PISON, M.-L. PONS & F. TEJEDOR (2011). *Biologie-Géologie BCPST-véto 2^e année*. Tec & Doc, Lavoisier, Paris.
- DENÈUD, J., C. GODINOT, O. GUIPPONI, H. MOREAU, M. PAULHIAC-PISON & F. TEJEDOR (2013). *Biologie-Géologie BCPST-véto 1^{re} année*. Tec & Doc, Lavoisier, Paris.
- DENÈUD, J., C. GODINOT, O. GUIPPONI, H. MOREAU, M. PAULHIAC-PISON, M.-L. PONS & F. TEJEDOR (2014). *Biologie-Géologie BCPST-véto 2^e année*. Tec & Doc, Lavoisier, Paris.
- DUCO, A. (dir.), C. BONNET, P. BRINGER, C. BUSSIÈRE, F. CARIOU, M. CHARLES, A. CLAMENS, J.-P. ESTEBAN, M. GALLIZIA, D. GRANDOUILLET, S. KROGMANN, C. LENNE, J.-F. MOYEN, C. MULNET, D. MULNET, M. NAESSENS & F. SCHMITT, 2001. *SVT Sciences de la Vie et de la Terre Première S*. Belin, Paris.
- FUJIL, J. (2019). Chapter 6. Catalytic Proteins – Enzymes, pages 61-74. In BAYNES, J. W. & M. H. DOMINICZAK (dir.). *Medical Biochemistry*. 5^e édition (1^{re} édition 1999). Elsevier, Amsterdam.
- GODINOT, C., H. MOREAU, M. PAULHIAC-PISON & F. TEJEDOR (2010). *Biologie-Géologie 1^{re} année BCPST-véto*. Tec & Doc, Lavoisier, Paris.
- LAFON, C. (2003). *La biologie autrement. 100 questions de synthèse*. Ellipses, Paris.
- LATRUFFE, N. (dir.), F. BLEICHER-BARDETTI, B. DUCLOS & J. VAMECQ (2014). *Biochimie. Tout le cours en fiches. Licence. PACES-UE1. CAPES*. Dunod, Paris.
- LIZEAUX, C., D. BAUDE (dir.), C. BRUNET, B. FORESTIER, E. FRANÇOIS, Y. JUSSEURAND, P. PILLOT, S. RABOUIN & A. VAREILLE (2011). *Sciences de la Vie et de la Terre 1^{re} S*. Bordas, Paris.
- MADIGAN, M. & J. MARTINKO (2007). *Brock. Biologie des micro-organismes*. Pearson Education France, Paris, 11^e édition américaine (2006) traduite sous la dir. de D. PRIEUR.
- MARCONIS, C., P. MARTY, D. RICHARD & M. SEBBAH (1990). *Neurobiologie. 1. Le système nerveux : système de communication*. Hachette, Paris.
- MARIEB, E. N. (2005). *Anatomie et physiologie humaines*. Renouveau pédagogique, Saint-Laurent (Québec, Canada), Diffusion Pearson Education France, Paris, 6^e édition américaine (2004) adaptée par R. LACHAÏNE.
- MARIEB, E. N. & K. HOEHN (2015). *Anatomie et physiologie humaines*. Pearson, Montréal (Québec, Canada), 9^e édition américaine adaptée par L. MOUSSAKOVA & R. LACHAÏNE.
- MEYER, S., C. REEB & R. BOSDEVEIX (2008). *Botanique. Biologie et physiologie végétales*. Maloine, Paris, 2^e édition (1^{re} édition 2004).
- MEYER, S., C. REEB & R. BOSDEVEIX (2019). *Botanique. Biologie et physiologie végétales*. Maloine, Paris, 3^e édition (1^{re} édition 2004).
- MORÈRE, J.-L., R. PUJOL (coord.), J.-C. CALLEN, L. CHESNOY, J.-P. DUPONT, A.-M. GIBERT-TANGAPREGASSOM, G. RICOU, N. TOUZET (dir.) et collaborateurs (2003). *Dictionnaire raisonné de Biologie*. Frison-Roche, Paris.
- MOROT-GAUDRY, J.-F. (dir.) (1997). *Assimilation de l'azote chez les plantes*. INRA, Versailles.
- MOROT-GAUDRY, J.-F. (dir.), F. MOREAU, R. PRAT, C. MAUREL & H. SENTENAC (2009). *Biologie végétale. Nutrition et métabolisme*. Dunod, Paris.
- MOUSSART, C. (2010). *Biochimie et biologie moléculaire*. De Boeck, Bruxelles (B).
- PÉRILLEUX, É., D. RICHARD, B. ANSELME, J.-M. DEMONT & P. VALET (2002). *Biologie humaine. Anatomie, physiologie, santé*. Nathan, Paris, 2^e édition.
- PERRIER, C. & J.-F. BEAUX (dir.), A. BOUFFIER, L. BOUGEOIS, P. CARRÈRE, T. DARRIBÈRE, J. DÉMARET-NICOLAS, A. EMOND, S. MAURY, O. MONNIER, T. SOUBAYA, A. VERGNAUD & A. WOEHRLÉ (2021). *Biologie-Géologie BCPST 1. Tout-en-un*. Dunod, Paris.
- PERRIER, C. & J.-F. BEAUX (dir.), A. BOUFFIER, S. COCQ, T. DARRIBÈRE, E. DOUZERY, S. HURTREZ-BOUSSÈS, S. MAURY, O. MONNIER & T. SOUBAYA (2022). *Biologie-Géologie BCPST 2. Tout-en-un*. Dunod, Paris.
- PEYCRU, P. (dir.), J.-F. FOGELGESANG, D. GRANDPERRIN, B. AUGÈRE, J.-C. BAEHR, C. PERRIER, J.-M. DUPIN & C. VAN DER REST (2010a). *Biologie tout-en-un BCPST 1^{re} année*. Dunod, Paris, 2^e édition (2009), réimpression corrigée (2010) (1^{re} édition 2006).
- PEYCRU, P. (dir.), J.-C. BAEHR, F. CARIOU, D. GRANDPERRIN, C. PERRIER, J.-F. FOGELGESANG & J.-M. DUPIN (2010b). *Biologie tout-en-un BCPST 2^e année*. Dunod, Paris, 2^e édition (1^{re} édition 2007).
- PEYCRU, P., D. GRANDPERRIN, C. PERRIER (dir.), B. AUGÈRE, T. DARRIBÈRE, J.-M. DUPIN, C. ESCUYER J.-F. FOGELGESANG, & C. VAN DER REST (2013). *Biologie tout-en-un BCPST 1^{re} année*. Dunod, Paris, 3^e édition (1^{re} édition 2006).
- PEYCRU, P., D. GRANDPERRIN, C. PERRIER (dir.), B. AUGÈRE, J.-F. BEAUX, F. CARIOU, P. CARRÈRE, T. DARRIBÈRE, J.-M. DUPIN, C. ESCUYER, J.-F. FOGELGESANG, S. MAURY, É. QUÉINNEC, E. SALGUEIRO & C. VAN DER REST (2014). *Biologie tout-en-un BCPST 2^e année*. Dunod, Paris, 3^e édition (1^{re} édition 2007).
- RAVEN, P. H., G. B. JOHNSON, J. B. LOSOS, S. S. SINGER (2007a). *Biologie*. De Boeck, Bruxelles, 1250 pages + xxiv + annexes.
- RAVEN, P. H., R. F. EVERT & S. E. EICHHORN (2007b). *Biologie végétale*. De Boeck, Bruxelles. Traduction de la 7^e édition américaine par J. Bouharmont, révision C. Evrard.
- RICHARD, D. (dir.), P. CHEVALET, S. FOURNEL, N. GIRAUD, F. GROS, P. LAURENTI, F. PRADÈRE & T. SOUBAYA (2012). *Biologie. Tout le cours en fiches. Licence. CAPES. Prépas*. Dunod, Paris, 2^e édition (1^{re} édition 2010).
- RICHARD, D. (dir.), P. CHEVALET, S. FOURNEL, N. GIRAUD, F. GROS, P. LAURENTI, F. PRADÈRE & T. SOUBAYA (2015). *Biologie. Tout le cours en fiches. Licence. CAPES. Prépas*. Dunod, Paris, 3^e édition (1^{re} édition 2010).
- RIEUTORT, M. (1998). *Physiologie animale. 1. Les cellules dans l'organisme*. Mise à jour M. RIEUTORT & D. PICHARD (coll. M. RIEUTORT). Masson, Paris, 2^e édition (1^{re} édition 1982).
- RIEUTORT, M. (1999). *Physiologie animale. 2. Les grandes fonctions*. Mise à jour D. PICHARD. Masson, Paris, 2^e édition (1^{re} édition 1982).
- SAINTPIERRE, F., C. BORDI (dir.), M. ALGRAIN, Y. KRAUSS, I. MOLLIERE & H. CLAUCE (2017). *Mémento Biologie BCPST 1^{re} et 2^e années*. Vuibert, Paris.
- SAINTPIERRE, F., C. BORDI (dir.), M. ALGRAIN-PITAVY, A. DENIS, L. GERAY & I. MOLLIERE (2021). *Mémento Biologie BCPST 1^{re} et 2^e années*. Vuibert, Paris, 2^e édition (1^{re} édition 2017).

- SEGARRA, J. (dir.), É. CHAUVET, C. COLSON-PROCH, M. HUILLE, M. LABROUSSE, F. LOUET, F. METZ & E. PIÈTRE (2014). *Biologie BCPST 1^{re} année*. Ellipses, Paris.
- SEGARRA, J., E. PIÈTRE (dir.), G. BAILLY, O. CHASSAING, D. FAVRE, T. JEAN, F. METZ & C. MEUNIER (2015). *Biologie BCPST 2^e année*. Ellipses, Paris.
- SEGARRA, J., E. PIÈTRE (dir.), C. AHYERRE, G. BAILLY, É. CHAUVET, D. FAVRE, M. HUILLE, T. JEAN, F. METZ, C. PROCH & F. SONTONNAX (2023). *BCPST 1^{re} année Biologie. 2^e édition*. Ellipses, Paris.
- SILVERTHORN, D. U., avec W. C. OBER, C. W. GARRISON, A. C. SILVERTHORN & B. R. JOHNSON (2007). *Physiologie humaine. Une approche intégrée*. Pearson Education France, Paris, 4^e édition américaine traduite sous la dir. de J.-F. BRUN.
- TAIZ, L. & E. ZEIGER (dir.) (2010). *Plant physiology*. Sinauer Associates, Sunderland (Massachusetts, USA), 5^e édition (1^{re} édition 1991).
- TORTORA, G. J. & B. DERRICKSON (2009). *Manuel d'anatomie et de physiologie humaines*. Adaptation française L. MARTIN & M. FOREST. De Boeck, Bruxelles, B.
- [VANDER, A. J.], E. P. WIDMAIER, H. RAFF & K. T. STRANG (2013). *Physiologie humaine. Les mécanismes du fonctionnement de l'organisme*. Maloine, Paris, 6^e édition.
- VOET, D. & J. G. VOET (2005). *Biochimie*. De Boeck, Bruxelles (B), 2^e édition française [3^e édition américaine, John Wiley and sons, New York, USA, 2004. Traduction G. ROUSSEAU & L. DOMENJOURD].
- WILLEY, J. M., L. M. SHERWOOD & C. J. WOOLVERTON (2018). *Microbiologie de PRESCOTT*. Traduction de la 10^e édition américaine par J. COYETTE, J.-P. JOSELEAU & R. PERRAUD. De Boeck, Louvain-la-Neuve (Belgique), 5^e édition (1^{re} édition 1999).

Plan du chapitre

Objectifs : extraits du programme	1
Introduction générale au métabolisme	2
Introduction du chapitre	2
I. Vue d'ensemble sur le fonctionnement énergétique et métabolique des cellules et l'origine de la matière organique	3
A. La diversité des formes d'énergie mises en jeu chez les êtres vivants	3
B. L'énergie de GIBBS et le caractère endergonique ou exergonique d'une réaction chimique	3
C. La nécessité de couplages énergétiques dans les cellules	3
D. L'origine environnementale – organique ou minérale – de l'énergie employée par les êtres vivants	4
1. L'environnement, un ensemble de ressources... pas forcément biodisponibles	4
2. Les grands types métaboliques (= types trophiques)	4
a. En fonction de la source d'énergie : phototrophes (source : lumière) vs. chimiotrophes (source : oxydation de matière)	4
b. En fonction de la source de carbone : autotrophes au carbone (source : CO ₂) vs. hétérotrophes au carbone (source : matière organique pré-existante)	4
c. En fonction du donneur initial d'électrons : lithotrophes (donneur minéral) vs. organotrophes (donneur organique)	4
E. Le rôle central des enzymes dans la réalisation et le contrôle des réactions chimiques du vivant	5
F. L'importance métabolique de la compartimentation cellulaire	5
1. La compartimentation, une caractéristique permettant la séparation des milieux réactionnels et ainsi la spécialisation métabolique des volumes cellulaires	5
2. Panorama des principales réactions de catabolisme et d'anabolisme dans les cellules eucaryotes	5
3. Un métabolisme en « réseau » (notion de carte métabolique) où les voies sont interconnectées	7
4. La présence de molécules carrefours, des points de convergence de plusieurs voies métaboliques (exemples du pyruvate et de l'acétyl-CoA)	8
G. Les trois principales formes d'énergie directement utilisables dans les activités cellulaires	8
1. L'emploi de pouvoir réducteur (énergie chimique) : réactions d'oxydoréduction et importance des coenzymes d'oxydoréduction	8
2. L'utilisation de gradients chimiques ou électrochimiques membranaires (énergie osmotique)	9
3. L'utilisation de nucléosides triphosphates, notamment l'ATP (énergie chimique)	9
4. Proposition de bilan	10
H. Un positionnement métabolique central de l'ATP	10
1. L'ATP, molécule dont l'hydrolyse est fortement exergonique	10
a. Un nucléoside triphosphate	10
b. Une molécule à haut potentiel d'hydrolyse des liaisons anhydride phosphorique, libérant plus de 30 kJ • mol ⁻¹ en conditions standard	11
c. Un potentiel d'hydrolyse néanmoins intermédiaire parmi les molécules de transfert de groupement phosphate	11
2. L'ATP, molécule régénérable par divers processus	12
a. Trois modalités de régénération	12
α. La phosphorylation oxydative, un couplage globalement chimiochimique permis par la chaîne respiratoire et l'ATP synthase	12
β. La photophosphorylation, un couplage globalement photochimique permis par la chaîne photosynthétique et l'ATP synthase	12

γ. La phosphorylation au niveau du substrat (= transphosphorylation), un couplage chimiochimique où le phosphate est transféré d'une molécule phosphorylée vers l'ADP	12	b. Des mécanismes permettant la conversion de l'énergie lumineuse en ATP et pouvoir réducteur (couplage globalement photochimique)	21
δ. Bilan	12	α. Une conversion photochimique assurée par des photosystèmes (PS)	21
b. Les voies métaboliques impliquant la régénération d'ATP	12	i. Les photosystèmes, complexes protéopigmentaires transmembranaires thylakoïdiens qui convertissent l'énergie lumineuse en énergie chimique au moyen d'une antenne collectrice et d'un centre réactionnel	21
c. Le rôle central des ATP synthases (= sphères pédonculées)	13	ii. L'effet EMERSON (1957), une mise en évidence de l'existence de deux photosystèmes qui peuvent fonctionner isolément mais fonctionnement davantage en synergie	22
α. Un complexe enzymatique très répandu dans le monde vivant et comprenant de multiples sous-unités	13	β. Une chaîne photosynthétique qui permet d'aboutir à la formation de pouvoir réducteur (NADPH,H ⁺) (couplage chimio-chimique) et d'un gradient de protons (couplage chimio-osmotique)	22
β. Localisation des sphères pédonculées dans les organites semi-autonomes	13	i. Diversité des composants de la chaîne photosynthétique et diagrammes énergétiques : notions de trajet acyclique (= schéma en Z) et de trajet cyclique	22
γ. Mise en évidence de l'importance de la force proton-motrice dans le fonctionnement de l'ATP synthase : expérience du « bain acide » de JAGENDORF & URIBE (1966)	14	ii. Une répartition des composés transmembranaires thylakoïdiens qui varie entre zones granaires et agranaires	26
δ. Le fonctionnement séquentiel de l'ATP synthase	14	iii. Résultat du fonctionnement de la chaîne photosynthétique : production de pouvoir réducteur et d'un gradient de protons	27
ε. L'essentiel : que retenir au minimum ?	14	γ. Un gradient de protons utilisé dans la synthèse d'ATP par l'ATP synthase : la photophosphorylation (couplage osmo-chimique)	27
3. L'ATP, une molécule aux multiples usages dans la cellule	15	c. Bilan de la phase photochimique	27
a. Une molécule source d'énergie de nombreuses activités cellulaires	15	4. La phase chimique de la photosynthèse : utilisation du pouvoir réducteur et de l'ATP dans la réduction du CO ₂ en matière organique (couplage chimio-chimique)	27
α. La synthèse de molécules organiques variées et de polymères : travaux chimiques (couplage chimio-chimique)	15	a. Les expériences de CALVIN (avec BENSON et BASSHAM) et la mise en évidence des réactions de la phase chimique	27
β. Le déplacement de compartiments et le mouvement : travaux mécaniques (couplage chimio-mécanique)	15	b. Le cycle de CALVIN-BENSON, des réactions en C3 utilisant de l'ATP et du pouvoir réducteur où la fixation du CO ₂ est assurée par l'activité carboxylase de la RuBisCO	28
γ. Le déplacement transmembranaire d'une substance contre son gradient chimique ou électrochimique : travaux osmotiques (couplage chimio-osmotique)	15	c. La dualité carboxylase-oxydase de la RuBisCO et la photorespiration	30
b. Autres usages cellulaires de l'ATP	15	α. Mise en évidence de la compétition entre dioxygène et dioxyde de carbone sur la rubisco : l'effet WARBURG (1919-1920)	30
α. Un nucléotide polymérisable en ARN	15	β. Mécanismes de la photorespiration : une coopération chloroplaste-péroxyso-mitocondrie	30
β. Un précurseur de l'AMPc, un second messenger	15	γ. Bilan et conséquences biologiques de la photorespiration	30
γ. Une molécule de contrôle du métabolisme	15	5. Vision synthétique de la photosynthèse et couplage des phases photochimique et chimique	33
i. Un contrôle direct inhibiteur ou activateur de l'activité enzymatique	15	C. Des modalités particulières de fixation du CO ₂ chez les plantes à photosynthèse en C4 et photosynthèse de type CAM [pour information]	34
ii. Une participation au contrôle par modification covalente des enzymes	15	D. Importance écosystémique de la photosynthèse : quelques remarques	35
II. Le métabolisme autotrophe des cellules végétales : réduction du carbone d'origine minérale à la lumière	16	III. Le métabolisme autotrophe de <i>Nitro bacter</i> , Bactérie nitrifiante puisant dans le milieu énergie chimique et matière minérale	36
A. La plante, organisme constitué de tissus autotrophes et hétérotrophes, ce qui suppose des corrélations trophiques entre cellules	16	A. La nitrification, un processus qui s'inscrit dans le cycle de l'azote	36
B. La réduction du CO ₂ et la synthèse glucidique en présence de lumière : la photosynthèse en C3	16	1. Un cycle de l'azote simplifié	36
1. Mise en évidence d'une synthèse de matière organique à la lumière en présence de dioxyde de carbone	16	a. Un cycle largement dû à des réactions d'oxydoréduction	36
a. Dégagement de dioxygène à la lumière et en présence de CO ₂	16	b. Transferts et réservoirs du cycle de l'azote	37
b. Production de matière organique carbonée à la lumière	17	2. La nitrification, une étape de la nitrification (= nitrosation + nitrification) dans les sols ou les milieux aquatiques	37
c. L'importance d'un composé oxydé subissant une réduction lors des réactions à la lumière : l'expérience de HILL (1937)	17	B. Modalités et mécanismes de la nitrification chez <i>Nitro bacter</i>	37
d. La lumière et le CO ₂ comme facteurs limitants de la photosynthèse et la notion de point de compensation	17	a. Une chaîne de transport d'électrons qui produit, d'un côté de l'ATP, et de l'autre du pouvoir réducteur (NADH,H ⁺)	37
2. La photosynthèse, une réduction du CO ₂ en matière organique au moyen de l'énergie lumineuse qui a lieu dans les chloroplastes	18	α. Une oxydation des nitrites en nitrates qui libère des électrons et de l'énergie	37
3. La phase photochimique de la photosynthèse : captation et conversion d'énergie lumineuse en ATP et pouvoir réducteur (couplage photochimique) au niveau des thylakoïdes	18	β. Devenir 1 : des électrons qui finissent acceptés par le dioxygène (O ₂ réduit en eau H ₂ O par la cytochrome oxydase), assurant la mise en place d'un gradient de protons assurant le fonctionnement des ATP synthases	37
a. Des structures favorisant la captation de lumière : localisation du processus aux différentes échelles	18		
α. À l'échelle de l'organe : la feuille, organe aplati et fin favorisant la captation de lumière	18		
β. À l'échelle du tissu : la feuille, un organe riche en parenchyme chlorophyllien	18		
γ. À l'échelle de la cellule, de l'organite et des molécules : des cellules dont les chloroplastes présentent des thylakoïdes riches en pigments assimilateurs	20		
δ. Des pigments riches en liaisons conjuguées dont le spectre d'absorption correspond au spectre d'action de la photosynthèse (incl. expérience d'ENGELMANN)	20		

y. Devenir 2 : des électrons qui finissent acceptés par le NAD ⁺ réduit en NADH,H ⁺ dans le cadre d'une chaîne électronique « inversée »	37
b. Aspects énergétiques	39
c. De l'ATP et du pouvoir réducteur essentiels au cycle de CALVIN où le CO ₂ est réduit en matière organique	39
C. Comparaison de la photo-autotrophie des Angiospermes et la chimio-autotrophie de Nitrobacter	40
IV. Un prélèvement de matière organique déjà existante dans le milieu : l'hétérotrophie	42
A. Deux modalités principales : l'absorbotrophie (ex. 'champignons') et la phagotrophie (ex. Métazoaires)	42
B. L'exemple des Mammifères, organismes phagotrophes	42
1. Une matière organique simplifiée par la digestion à partir de portions d'organismes vivants ingérés	42
2. Une matière organique typiquement prélevée au niveau intestinal (ou au niveau d'autres tronçons) après digestion	42
3. Une matière organique transportée par les systèmes circulatoires (sanguin et lymphatique)	43
4. Une matière organique entrant dans les cellules consommatrices par des transporteurs spécifiques (ou une endocytose)	44
5. Bilan	44
Pour faire une fiche de révision : quelques pistes	45
Références	46
Plan du chapitre	47
Plan simplifié du chapitre (3 niveaux)	49
Plan très simplifié du chapitre (2 niveaux)	50

Plan simplifié du chapitre (3 niveaux)

Objectifs : extraits du programme	1
Introduction générale au métabolisme	2
Introduction du chapitre	2
I. Vue d'ensemble sur le fonctionnement énergétique et métabolique des cellules et l'origine de la matière organique	3
A. La diversité des formes d'énergie mises en jeu chez les êtres vivants	3
B. L'énergie de GIBBS et le caractère endergonique ou exergonique d'une réaction chimique	3
C. La nécessité de couplages énergétiques dans les cellules	3
D. L'origine environnementale – organique ou minérale – de l'énergie employée par les êtres vivants	4
1. L'environnement, un ensemble de ressources... pas forcément biodisponibles	4
2. Les grands types métaboliques (= types trophiques)	4
E. Le rôle central des enzymes dans la réalisation et le contrôle des réactions chimiques du vivant	5
F. L'importance métabolique de la compartimentation cellulaire	5
1. La compartimentation, une caractéristique permettant la séparation des milieux réactionnels et ainsi la spécialisation métabolique des volumes cellulaires	5
2. Panorama des principales réactions de catabolisme et d'anabolisme dans les cellules eucaryotes	5
3. Un métabolisme en « réseau » (notion de carte métabolique) où les voies sont interconnectées	7
4. La présence de molécules carrefours, des points de convergence de plusieurs voies métaboliques (exemples du pyruvate et de l'acétyl-CoA)	8
G. Les trois principales formes d'énergie directement utilisables dans les activités cellulaires	8
1. L'emploi de pouvoir réducteur (énergie chimique) : réactions d'oxydoréduction et importance des coenzymes d'oxydoréduction	8
2. L'utilisation de gradients chimiques ou électrochimiques membranaires (énergie osmotique)	9
3. L'utilisation de nucléosides triphosphates, notamment l'ATP (énergie chimique)	9
4. Proposition de bilan	10
H. Un positionnement métabolique central de l'ATP	10
1. L'ATP, molécule dont l'hydrolyse est fortement exergonique	10
2. L'ATP, molécule régénérable par divers processus	12
3. L'ATP, une molécule aux multiples usages dans la cellule	15
II. Le métabolisme autotrophe des cellules végétales : réduction du carbone d'origine minérale à la lumière	16
A. La plante, organisme constitué de tissus autotrophes et hétérotrophes, ce qui suppose des corrélations trophiques entre cellules	16
B. La réduction du CO₂ et la synthèse glucidique en présence de lumière : la photosynthèse en C3	16
1. Mise en évidence d'une synthèse de matière organique à la lumière en présence de dioxyde de carbone	16
2. La photosynthèse, une réduction du CO ₂ en matière organique au moyen de l'énergie lumineuse qui a lieu dans les chloroplastes	18
3. La phase photochimique de la photosynthèse : captation et conversion d'énergie lumineuse en ATP et pouvoir réducteur (couplage photochimique) au niveau des thylakoïdes	18
4. La phase chimique de la photosynthèse : utilisation du pouvoir réducteur et de l'ATP dans la réduction du CO ₂ en matière organique (couplage chimio-chimique)	27

5. Vision synthétique de la photosynthèse et couplage des phases photochimique et chimique	33
C. Des modalités particulières de fixation du CO ₂ chez les plantes à photosynthèse en C4 et photosynthèse de type CAM [pour information]	34
D. Importance écosystémique de la photosynthèse : quelques remarques	35
III. Le métabolisme autotrophe de <i>Nitrobacter</i>, Bactérie nitratante puisant dans le milieu énergie chimique et matière minérale	36
A. La nitratisation, un processus qui s'inscrit dans le cycle de l'azote	36
1. Un cycle de l'azote simplifié	36
2. La nitratisation, une étape de la nitrification (= nitrosation + nitratisation) dans les sols ou les milieux aquatiques	37
B. Modalités et mécanismes de la nitratisation chez <i>Nitrobacter</i>	37
C. Comparaison de la photo-autotrophie des Angiospermes et la chimio-autotrophie de <i>Nitrobacter</i>	40
IV. Un prélèvement de matière organique déjà existante dans le milieu : l'hétérotrophie	42
A. Deux modalités principales : l'absorbotrophie (ex. 'champignons') et la phagotrophie (ex. Métazoaires)	42
B. L'exemple des Mammifères, organismes phagotrophes	42
1. Une matière organique simplifiée par la digestion à partir de portions d'organismes vivants ingérés	42
2. Une matière organique typiquement prélevée au niveau intestinal (ou au niveau d'autres tronçons) après digestion	42
3. Une matière organique transportée par les systèmes circulatoires (sanguin et lymphatique)	43
4. Une matière organique entrant dans les cellules consommatrices par des transporteurs spécifiques (ou une endocytose)	44
5. Bilan	44
Pour faire une fiche de révision : quelques pistes	45
Références	46
Plan du chapitre	47
Plan simplifié du chapitre (3 niveaux)	49
Plan très simplifié du chapitre (2 niveaux)	50

Plan très simplifié du chapitre (2 niveaux)

Objectifs : extraits du programme	1
Introduction générale au métabolisme	2
Introduction du chapitre	2
I. Vue d'ensemble sur le fonctionnement énergétique et métabolique des cellules et l'origine de la matière organique	3
A. La diversité des formes d'énergie mises en jeu chez les êtres vivants	3
B. L'énergie de GIBBS et le caractère endergonique ou exergonique d'une réaction chimique	3
C. La nécessité de couplages énergétiques dans les cellules	3
D. L'origine environnementale – organique ou minérale – de l'énergie employée par les êtres vivants	4
E. Le rôle central des enzymes dans la réalisation et le contrôle des réactions chimiques du vivant	5
F. L'importance métabolique de la compartimentation cellulaire	5
G. Les trois principales formes d'énergie directement utilisables dans les activités cellulaires	8
H. Un positionnement métabolique central de l'ATP	10
II. Le métabolisme autotrophe des cellules végétales : réduction du carbone d'origine minérale à la lumière	16
A. La plante, organisme constitué de tissus autotrophes et hétérotrophes, ce qui suppose des corrélations trophiques entre cellules	16
B. La réduction du CO ₂ et la synthèse glucidique en présence de lumière : la photosynthèse en C3	16
C. Des modalités particulières de fixation du CO ₂ chez les plantes à photosynthèse en C4 et photosynthèse de type CAM [pour information]	34
D. Importance écosystémique de la photosynthèse : quelques remarques	35
III. Le métabolisme autotrophe de <i>Nitrobacter</i>, Bactérie nitratante puisant dans le milieu énergie chimique et matière minérale	36
A. La nitratisation, un processus qui s'inscrit dans le cycle de l'azote	36
B. Modalités et mécanismes de la nitratisation chez <i>Nitrobacter</i>	37
C. Comparaison de la photo-autotrophie des Angiospermes et la chimio-autotrophie de <i>Nitrobacter</i>	40
IV. Un prélèvement de matière organique déjà existante dans le milieu : l'hétérotrophie	42
A. Deux modalités principales : l'absorbotrophie (ex. 'champignons') et la phagotrophie (ex. Métazoaires)	42
B. L'exemple des Mammifères, organismes phagotrophes	42
Pour faire une fiche de révision : quelques pistes	45
Références	46
Plan du chapitre	47
Plan simplifié du chapitre (3 niveaux)	49
Plan très simplifié du chapitre (2 niveaux)	50

© Tanguy JEAN. Les textes et les figures originales sont la propriété de l'auteur. Les figures extraites d'autres sources restent évidemment la propriété des auteurs ou éditeurs originaux.
Document produit en avril 2023 (inspiré de supports antérieurs de TB et d'ATS Bio) • Dernière actualisation : avril 2024.

Contact : Tanguy.Jean4@gmail.com

Adresse de téléchargement : <https://www.svt-tanguy-jean.com/>



Ces données sont placées sous licence *Creative Commons Attribution – Pas d'Utilisation commerciale 4.0 CC BY NC* qui autorise la reproduction et la diffusion du document, à condition d'en citer explicitement la source et de ne pas en faire d'utilisation commerciale.