



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

PROPOSITION DE FICHE À COMPLÉTER

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

Système thermodynamique ouvert :

Cas des *cellules* (et des *organismes*)

Évolution loin de l'équilibre ; stabilité implique **dépense constante d'énergie dissipée** dans l'environnement ⇒ **systèmes biologiques = dissipatifs**

Métabolisme :

- anabolisme :

Souvent : *réductions*

- catabolisme :

Souvent : *oxydations*

Turn-over moléculaire = renouvellement régulier des constituants moléculaires d'une cellule et/ou d'un être vivant.

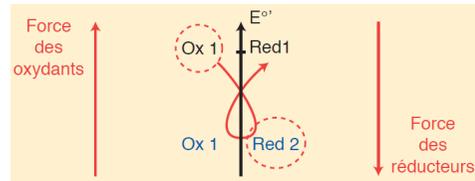
Réactions biochimiques → catalysées par des **enzymes** (ou des **ribosomes**)

Encadré A Rappels sur l'oxydoréduction

Réduction = gain d'électrons
(plutôt endergonique)



Oxydation = perte d'électrons
(plutôt exergonique)



Introduction du chapitre

Hétérotrophie :

Autotrophie :

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

Énergie :

Travail :

A. La diversité des formes d'énergie mises en jeu chez les êtres vivants
Énergies chimique / osmotique* / photonique / mécanique / thermique...

* (!) Qualifie **tous les transports transmembranaires** (pas seulement l'osmose !)

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

Énergie de GIBBS :

Réaction endergonique (ΔG positif) :

Réaction exergonique (ΔG négatif) :

En pratique, en biologie, on utilise l'**enthalpie libre de réaction standard** notée ΔG^0 ou $\Delta_r G^0$ qui correspond à des **conditions biologiques standard** (pression de 1 atm, température d'environ 25 °C) pour des réactifs et produits initialement concentrés à 1 mol/L.

C. La nécessité de couplages énergétiques dans les cellules

Couplage énergétique :

Indispensables aux **travaux endergoniques**

(!) Le **bilan** est toujours **exergonique**.

(!) Grande **diversité de couplages** dans les cellules

- Un **couplage énergétique** porte le nom d'**abord du travail libérateur d'énergie** et ensuite du **travail consommateur**.
- **Attention** toutefois, il existe une **théorie chimiosmotique**, proposée par l'Américain Peter D. MITCHELL (1920-1992) en 1964, qui postule que **c'est le gradient de protons (énergie osmotique) qui permet la production membranaire d'ATP (énergie chimique) dans les mitochondries et chloroplastes**. Eh bien là, les préfixes « chimio- » et « osmo- » sont dans l'autre sens ! Car il s'agit pourtant bien d'un **couplage osmo-chimique** dont parle cette théorie « chimiosmotique » !!!



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

▲ FIGURE 2. Le principe d'un couplage énergétique. Schéma original.

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

Ressource :
Ressource biodisponible

2. Les grands types métaboliques (= types trophiques)

Type trophique (= type métabolique) :

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

Phototrophie :
Chimiotrophie :

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

Autotrophie :
Hétérotrophie :

Notez qu'un **organisme pluricellulaire autotrophe** peut, dans le détail, présenter des **cellules hétérotrophes** et des **cellules autotrophes** – ce qui suppose des **corrélations trophiques** entre tissus de l'organisme (exemple : Angiospermes).

[Revoir le chapitre 2 \(Fabacée\) et le chapitre 4 \(Nutrition des Angiospermes\)](#)

Dans le cas de l'**autotrophie à l'azote**, ce sont souvent les **nitrate NO₃⁻** et/ou l'**ammonium NH₄⁺** qui sont des **sources minérales d'azote**. Notez qu'il est possible d'être **hétérotrophe au carbone** mais **autotrophe à l'azote** comme le sont de nombreux 'champignons'.

[Revoir le chapitre 2 \(Fabacée\) et le chapitre 4 \(Nutrition des Angiospermes\)](#)

On parle de **mixotrophie** lorsqu'un organisme est à la fois **hétérotrophe et autotrophe (soit simultanément, soit successivement)**.

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

Lithotrophie :
Organotrophie :



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



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



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

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

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

Enzyme :

Modes de **contrôle d'activité enzymatique** :

-
-
-
-

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**

Principales réactions cataboliques :

Dans le cytosol :
Dans la mitochondrie :

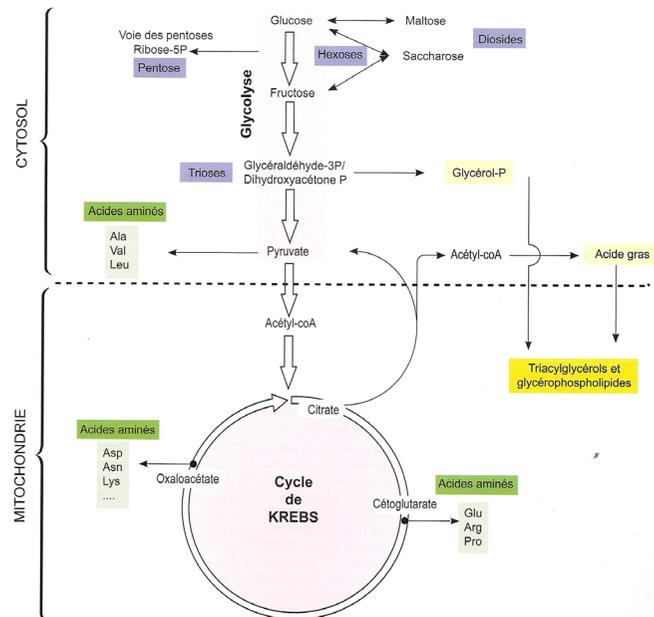
Principales réactions anaboliques :

Dans le cytosol :
Dans le REG et le GOLGI :

Dans le REL :
Dans le noyau :
Au niveau de la membrane plasmique :
Dans le chloroplaste :

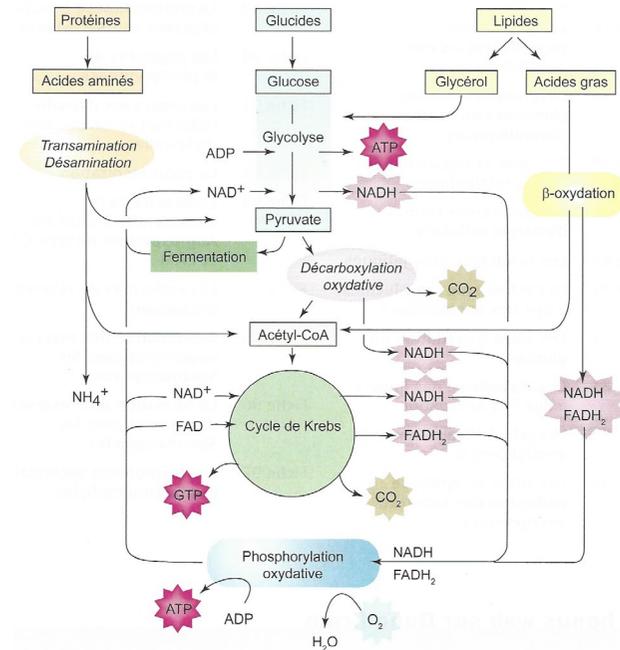
3. Un métabolisme en « réseau » (notion de carte métabolique) où les voies sont interconnectées

Carte métabolique :



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

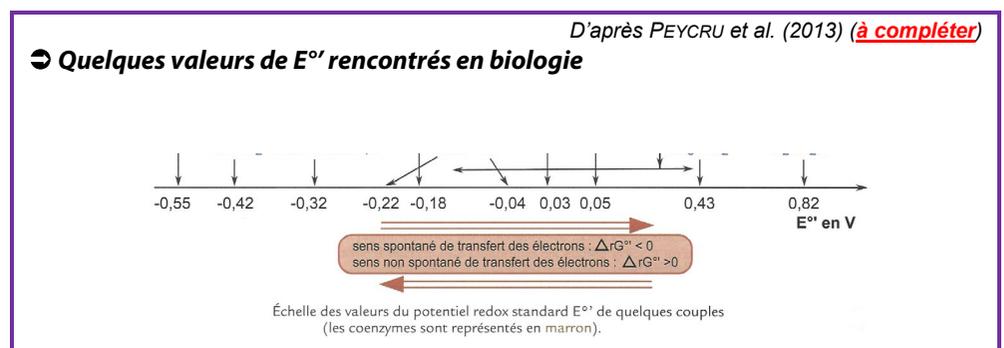
4. La présence de molécules carrefours, des points de convergence de plusieurs voies métaboliques (exemples du pyruvate et de l'acétyl-CoA)



▲ 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



Fonction oxydo-réductase de nombre d'enzymes

→ Implication de **cofacteurs subissant les réactions d'oxydo-réduction**
= **coenzymes d'oxydoréduction**

>> **Potentiel redox intermédiaire** (encadré) entre des couples à haut et bas potentiel

⇒ fonction de « **navettes à électrons** »

Principaux **coenzymes redox** :

-

-

-

-

Deux **groupes fonctionnels** (avec exemples) :

-

-

▲ **FIGURE 10. Trois coenzymes d'oxydoréduction.**

D'après PEYCRU *et al.* (2013)

*Inspirez-vous des **schémas de début d'année** (chapitre 8) !*

2. L'utilisation de gradients chimiques ou électrochimiques membranaires (énergie osmotique)

Utilisations (type de couplage) / exemple :

-

-

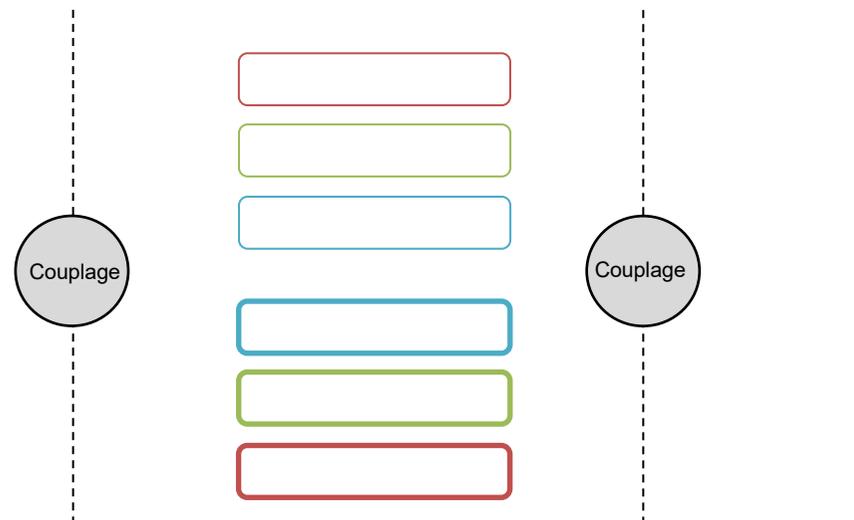
-

Remarque : quand **le transport exergonique (couplé à une activité endergonique) est un flux de protons**, on peut le désigner par l'expression **force proton-motrice**.

3. L'utilisation de nucléosides triphosphates, notamment l'ATP (énergie chimique)

ATP, GTP, CTP, UTP // souvent l'ATP (→ **suite du cours**) // traduction : GTP

4. Proposition de bilan



▲ **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

ATP =

Concentration cytosolique :

Renouvellement :

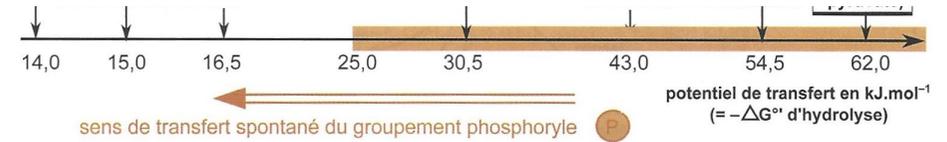
1. L'ATP, molécule dont l'hydrolyse est fortement exergonique

a. Un nucléoside triphosphate

▲ **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

- On dit qu'une molécule a un **haut potentiel d'hydrolyse** si la **valeur absolue du $\Delta rG^{0'}$** de son hydrolyse est **supérieure à 25 kJ • mol⁻¹**.



Échelle des potentiels de transfert du groupement phosphoryle 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) **A compléter**

2. L'ATP, molécule régénérable par divers processus

a. Trois modalités de régénération

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

δ. Bilan

b. Les voies métaboliques impliquant la régénération d'ATP

Principales voies de synthèse d'ATP :

-

-

(!) Existence aussi de la **voie de la créatine phosphate** dans les cellules musculaires.

D'après SEGARRA *et al.* (2014)

- Notez que l'**hydrolyse au sens le plus strict** d'une **liaison anhydride phosphorique**, c'est-à-dire sa **rupture par l'attaque d'une molécule d'eau**, est plutôt **rare** dans la réalité ; « l'hydrolyse » de l'ATP est en réalité le **bilan** d'une réaction en deux temps. >> La plupart du temps, l'ATP **phosphoryle** une **molécule**, souvent un **acide aminé** d'une **protéine**. Puis cette **molécule** est ensuite **déphosphorylée**.
- Il arrive enfin également **souvent** que le **phosphate** soit simplement **transféré** à une **autre molécule** sans que celle-ci ne subisse ensuite de **déphosphorylation**.

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

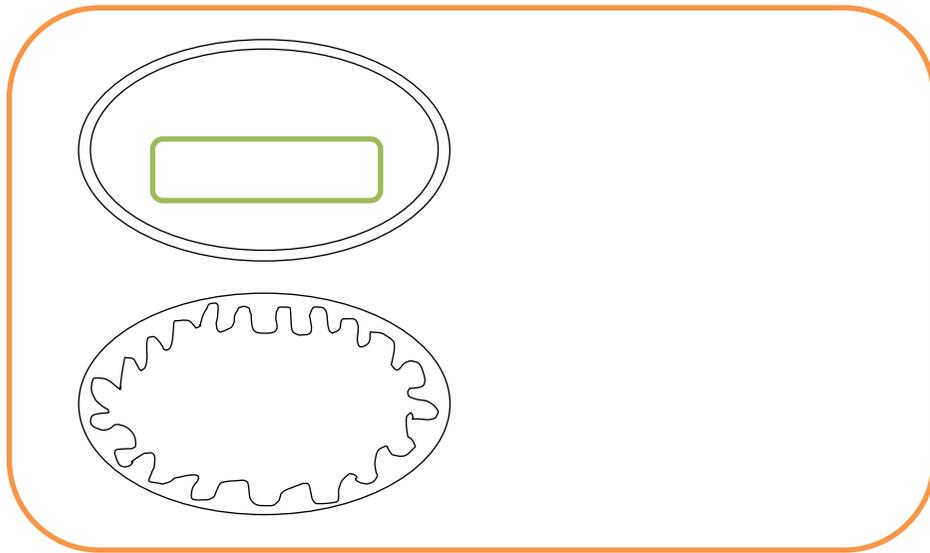
Position intermédiaire du **potentiel d'hydrolyse** (rigoureusement de transfert de phosphate) de l'ATP = lui permet à la fois d'être **régénéré** par l'hydrolyse/la déphosphorylation d'autres composés (ceux qui ont un potentiel plus élevé), et d'en **phosphoryler** d'autres (ceux qui ont un potentiel plus faible).

▼ TABLEAU II. 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	Liaisons à faible potentiel d'hydrolyse	Faible	
Glucose 1-phosphate	-20,9			
Fructose 6-phosphate	-13,8			
Glucose 6-phosphate	-13,8			



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

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

ATP synthase = ATP synthétase = sphère pédonculée :

Mb plasmique de nombreux 'procaryotes' / Mb interne mitochondriale / Mb thylakoïdienne

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

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

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

- Sous-unité γ mise en mouvement par rapport au stator (= essentiellement sous-unités α et β) qui, lui, est fixe
- Une rotation de 120° (→ 1 ATP) nécessite 3 H⁺
- Rotor : env. 130 tours / s ⇒ env. 390 ATP / s

ε. L'essentiel : que retenir au minimum ?

- Portions F0 / F1 [rotor / tige / stator]
- Passage de protons H⁺ dans le rotor (F0) >> Rotation [couplage osmo-mécanique]
- F1 (stator) : rotation / changement de conformation >> Phosphorylation d'ADP >> Production d'ATP [couplage mécano-chimique]

Coupage global : **couplage osmo-chimique** (force proton-motrice // synthèse d'ATP)

Structure-fonction

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

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

- γ. Le déplacement transmembranaire d'une substance contre son gradient chimique ou électrochimique : travaux osmotiques (couplage chimio-osmotique) = Transport actif primaire
 - a. Autres usages cellulaires de l'ATP

- α. Un nucléotide polymérisable en ARN (voire ADN)

ATP →

-

-

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

AMPc (Adénosine MonoPhosphate cyclique) :

- 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

▲ 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)

Rôle de l'ATP dans :

-
-
-

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

Nanomoteur = moteur moléculaire = protéine motrice :

→ Divisions, flux vésiculaire (mouvements de compartiments, cytosol), contraction musculaire, flagelle...

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

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

Revoir le chapitre 2 (Fabacée)

Organes sources :
Organes puits :
Corrélations trophiques :

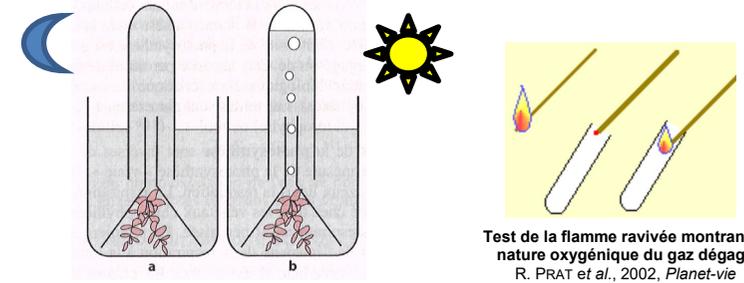
Notons bien que **toutes les cellules végétales**, qu'elles soient **autotrophes** ou **hétérotrophes**, réalisent le **catabolisme oxydatif** (dont la **respiration cellulaire**) !

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

Photosynthèse :
Métabolisme en C3 :

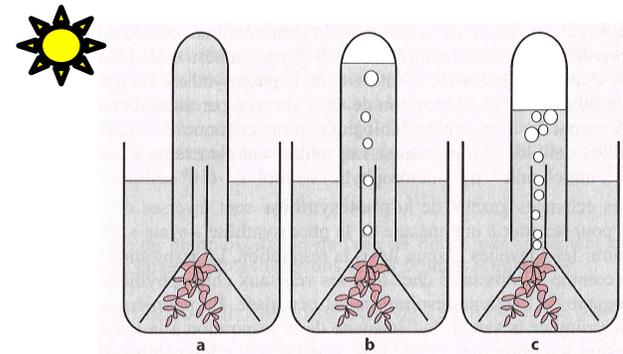
1. Mise en évidence d'une synthèse de matière organique à la lumière en présence de dioxyde de carbone

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



Test de la flamme ravivée montrant la nature oxygénante 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.

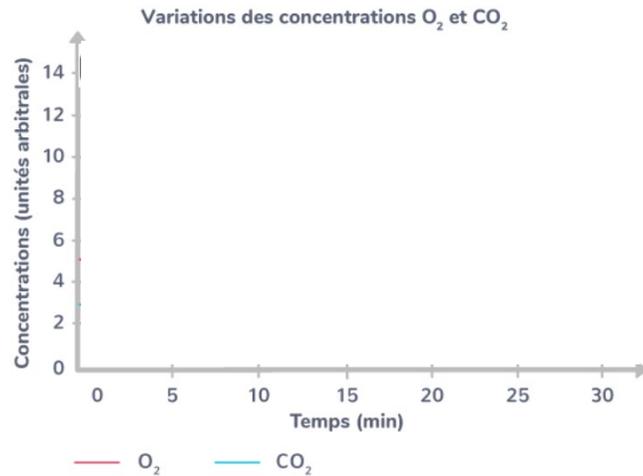
a) Dans l'eau distillée, b) dans de l'eau du robinet et c) dans de l'eau additionnée d'hydrogénocarbonate ou bicarbonate de sodium à 1 %. C'est en c) que la production de bulles d'oxygène est la plus importante.

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

▲ FIGURE 25. **Corrélations trophiques entre organes chez Angiospermes (été).**

D'après SEGARRA *et al.* (2015).

Utilisez le schéma fait en classe (cours Fabacée)

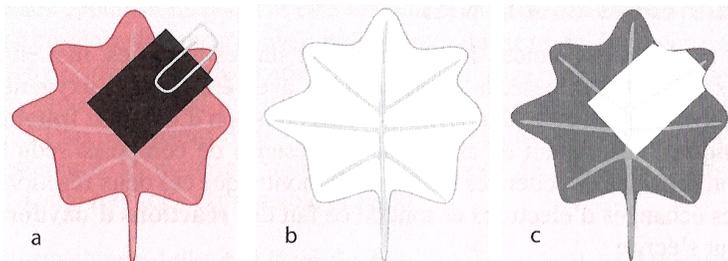


Outre la respiration (de 0 à 5 min et de 15 à 25 min), productrice de CO_2 et consommatrice d' O_2 , un phénomène se manifeste en présence de lumière (de 5 à 15 min), consommant du CO_2 et produisant de l' O_2 : la photosynthèse.

▲ 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

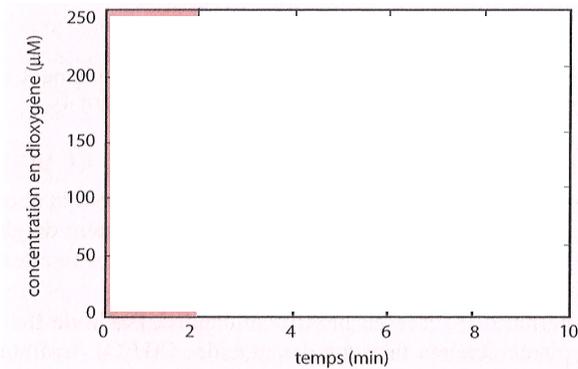


Synthèse d'amidon par la feuille à la lumière.

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'iode 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).

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



▲ R. HILL.
Wikipédia

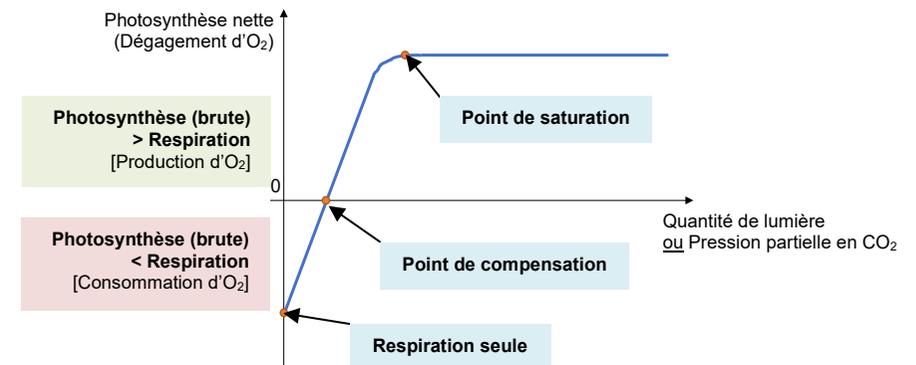
Émission de dioxygène (mesurée par une électrode à oxygène) à la lumière par des chloroplastes isolés, en absence de CO_2 .

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

Point de compensation :
Point de saturation :



▲ FIGURE. Compensation / saturation (à la lumière ou au CO_2). Original 2023.

Photosynthèse nette (PN) = la photosynthèse brute (PB) [dégagement de dioxygène par la photosynthèse] moins la respiration (R) [consommation de dioxygène par la respiration] :
 $PN = PB - R$

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

Équation bilan de la photosynthèse (en formules et en texte) :

Phase photochimique (« claire ») :

Phase chimique (« sombre », « thermochimique ») :

Ne pas recopier seulement les définitions : ajouter les réactifs, produits, localisation...

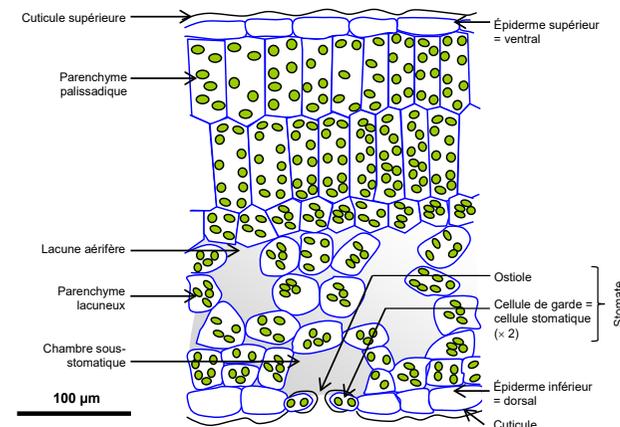
3. La phase photochimique de la photosynthèse : captation et conversion d'énergie lumineuse en ATP et pouvoir réducteur (couplage photochimique) au niveau des thylakoïdes

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

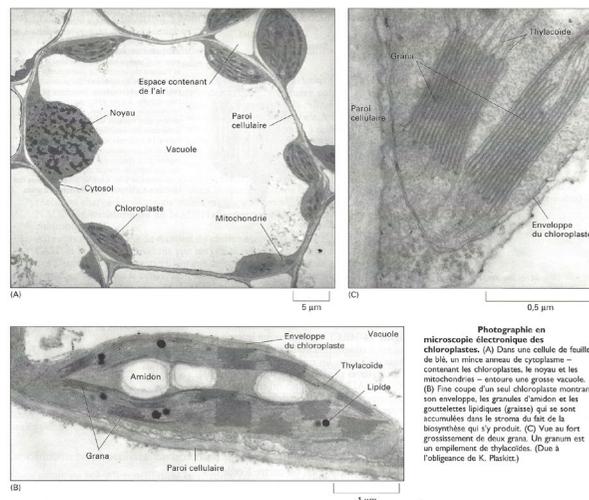
α. À l'échelle de l'organe : la feuille, organe aplati et fin favorisant la captation de lumière

- Dans toutes les parties chlorophylliennes, mais surtout les feuilles
- **Organe aplati** >> grande surface de captation
- **Organe fin** >> traversée par la lumière facilitée
- Présence d'un **mésophylle** riche en chloroplastes

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



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



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

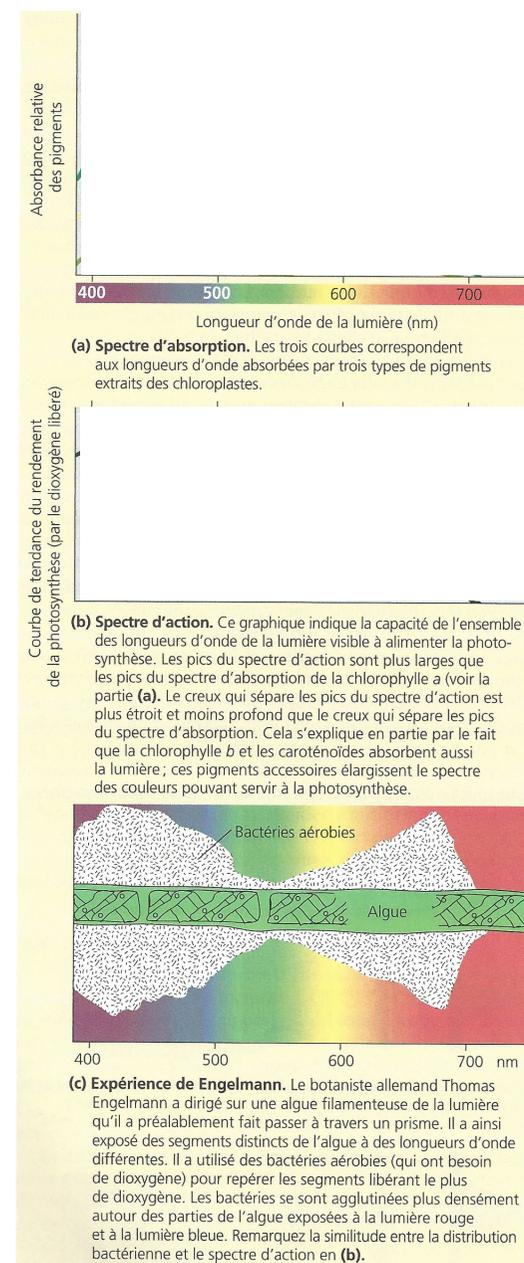
Pigments photosynthétiques (= assimilateurs) :

Nombreux e⁻ délocalisables : excitation / désexcitation par changement de palier électronique

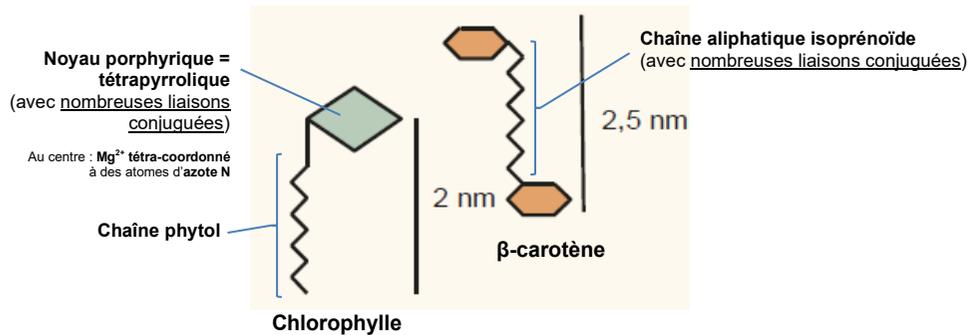
δ. Des pigments riches en liaisons conjuguées dont le spectre d'absorption correspond au spectre d'action de la photosynthèse (incl. expérience d'ENGELMANN)

Spectre d'absorption :

Spectre d'action :



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



▲ FIGURE 37. **Chlorophylle a (à gauche) et β -carotène (à droite).**
 Notez l'important réseau de liaisons conjuguées.
 D'après PERRIER, BEAUX *et al.* (2021).
 Sachez faire des schémas simplifiés !

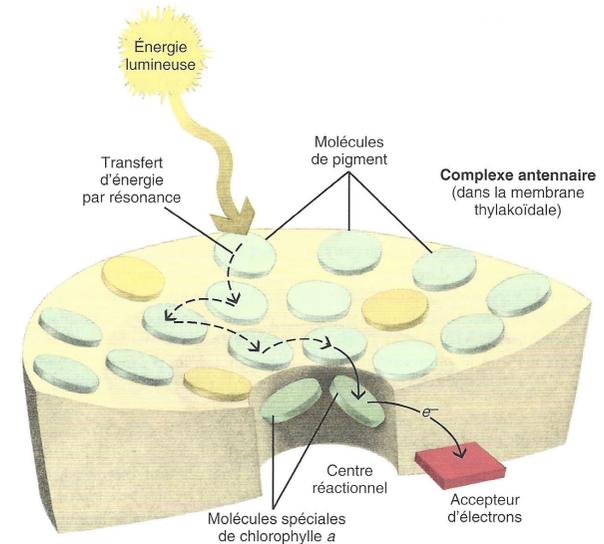
b. Des mécanismes permettant la conversion de l'énergie lumineuse en ATP et pouvoir réducteur (couplage globalement photochimique)

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

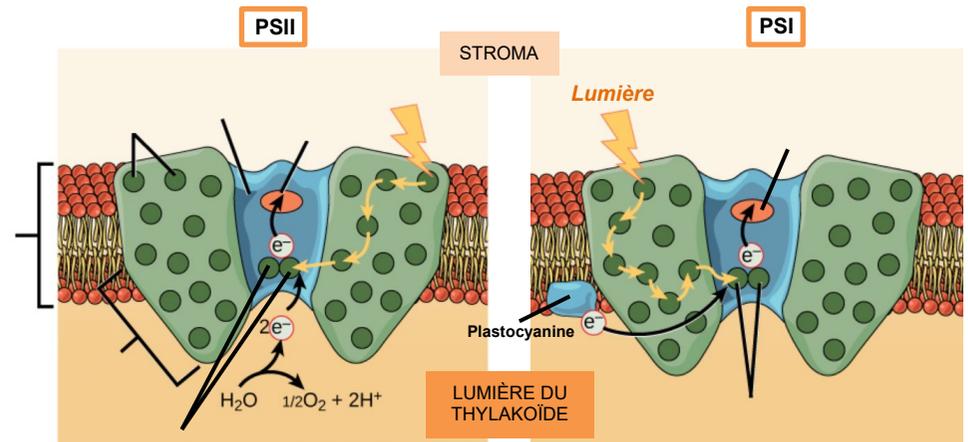
Photosystème (PS) :
- Antenne collectrice :
- Centre réactionnel :

(!) Richesse en **doubles liaisons conjuguées** → électrons **délocalisables** → la **captation des photons** fait **changer les électrons d'orbitales électroniques**
 ⇒ La **déséxcitation libère** ensuite de l'énergie dont une partie parvient, par **transmission de pigments en pigments** jusqu'à un **centre réactionnel** capable d'accepter les électrons



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)

À compléter

Transfert cyclique des électrons :

▲ FIGURE **au choix**. Représentation semi-détaillée de la chaîne photosynthétique.
Avec quand même un degré de précision raisonnable

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

- Régions **accolées** riches en **PSII**
- Régions **non accolées** riches en **PSI**
- **Complexe cytochromes b6-f** = partout
- **ATP-synthases** = **uniquement** dans les **régions non accolées**

(!) **Ensemble des lumens = compartiment unique** (car communications entre **thylakoïdes**, comme en attestent de multiples **observations au microscope électronique**)

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)

Photophosphorylation :

▲ FIGURE **au choix**. Diagramme(s) énergétique(s) de la chaîne photosynthétique : transferts cyclique et acyclique. **Au choix : sur le même diagramme ou sur deux diagrammes séparés (à mon avis préférable)**

c. Bilan de la phase photochimique

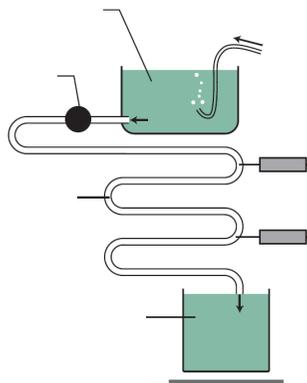
Couplage globalement photochimique décomposable en :

-
-
-
-

⇒ Production des **composés** qui fourniront l'énergie nécessaire à la réalisation de la phase chimique : le **pouvoir réducteur** sous forme de **NADPH, H⁺** et l'**ATP**.

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

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





▲ **Melvin CALVIN.**
Wikipédia



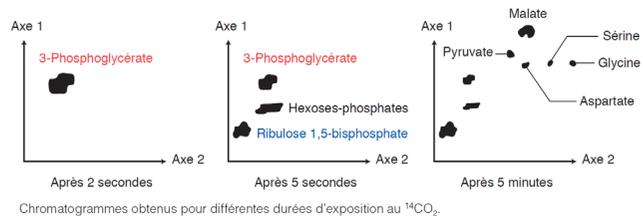
▲ **Andy BENSON.**
UC San Diego



▲ **James BASSHAM.**
Source à préciser

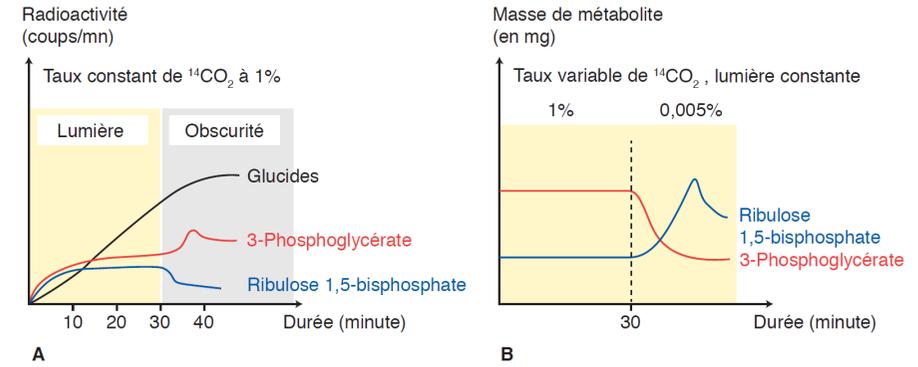
À compléter

Dispositif expérimental de CALVIN



Résultats obtenus

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

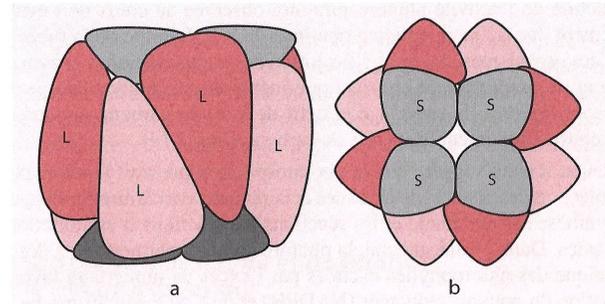


A. Suivi du marquage radioactif au ¹⁴CO₂ pour une culture de chlorelles selon des conditions d'éclairages différents ; B. selon des concentrations variables de CO₂.

▲ 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 CO₂ est assurée par l'activité carboxylase de la RuBisCO

La **rubisco** représente **65 % des protéines de la feuille** et c'est quantitativement **l'enzyme la plus répandue dans le monde vivant**. Cette enzyme comprend **16 sous-unités** mais présente une **cinétique michaelienne**. Une partie des **sous-unités** est codée par le **génomme plastidial** alors qu'une autre partie est codée par le **génomme nucléaire**.



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)

Au total 3 molécules d'ATP et 2 molécules de NADPH sont consommées lors de la conversion de chaque molécule de CO₂ en glucide. L'équation nette est :

$$3 \text{ CO}_2 + 9 \text{ ATP} + 6 \text{ NADPH} + \text{eau} \rightarrow \text{glycéraldéhyde 3-phosphate} + 8 \text{ P}_i + 9 \text{ ADP} + 6 \text{ NADP}^+$$

D'après ALBERTS *et al.* (2004)

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

Couplage entre les deux phases :

▲ FIGURE 64. **Résumé de la photosynthèse en C3**. D'après CAMPBELL & REECE (2004)
Le schéma fait dans le [chapitre 2](#) sera utilement refait ici

▲ FIGURE **au choix**. La photorespiration ou voie du glycolate.

Et que deviennent les trioses phosphates ?

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

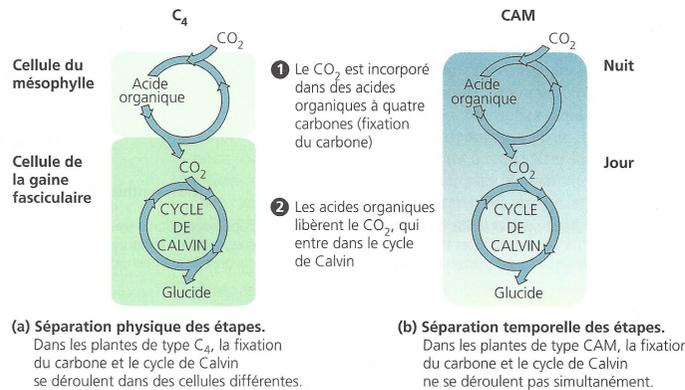
C. Des modalités particulières de fixation du CO₂ chez les plantes à photosynthèse en C₄ et photosynthèse de type CAM [pour information]

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)

Photosynthèse en C₄ :

Photosynthèse CAM (*Crassulacean Acid Metabolism*) :

▼ 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.

	C ₃	C ₄	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 (C ₃)	Malate (C ₄)	APG (C ₃) le jour Malate (C ₄) 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	> 1500	> 1500
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

Rôles écosystémiques de la photosynthèse :

-
-

Rôles écosystémiques de la respiration :

-
-

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

Bactérie nitratante :

Chimiotrophie :

Lithotrophie :

Autotrophie :

Chimiosynthèse :

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

Cycle biogéochimique = cycle de la matière :

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	
Oxyde nitreux (N ₂ O)	+1 (moyenne par N)	Composé très oxydé	
Oxyde d'azote (NO)	+2		
Nitrite (NO ₂ ⁻)	+3		
Composé peu réduit	Dioxyde d'azote (NO ₂)	+4	Composé très oxydé
	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 69. Cycle de l'azote simplifié. Original 2009.

b. Transferts et réservoirs du cycle de l'azote

Réservoirs = puits :

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

Nitrification =

- Nitrosation = nitritation :

Ex. *Nitrosomonas*

- Nitratisation :

Ex. *Nitrobacter*

Avec équations (à connaître) !

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 électons 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 électons qui finissent acceptés par le NAD⁺ réduit en NADH,H⁺ dans le cadre d'une chaîne électronique « inversée »

À résumer proprement et intelligemment (avec équations, évidemment)

b. Aspects énergétiques

Les **deux devenir des électrons** peuvent être rendus par un **diagramme énergétique** (figure 76) :

- La **voie expliquée en β** est **exergonique** ($\Delta_r G^{\circ} < 0$ car $\Delta E^{\circ} = + 0,4 \text{ V}$), assurant la **mise en place** d'un **gradient de protons** (à l'origine de la **synthèse d'ATP**).
- La **voie expliquée en γ** est **endergonique** ($\Delta_r G^{\circ} > 0$ car $\Delta E^{\circ} = - 0,8 \text{ V}$), nécessitant l'énergie du **gradient de protons**.

▲ 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

- **ATP + pouvoir réducteur (NADH, H⁺)** → **cycle de CALVIN** (→ réduction du **CO₂** en **matière organique** (trioses phosphates))
- Ces **molécules** ont d'autres fonctions :
 - L'**ATP** peut servir à l'**ensemble** des **activités cellulaires**.
 - Le **NADH, H⁺** peut servir à d'**autres voies métaboliques**, y compris à la **respiration cellulaire** (il y a alors fonctionnement « normal » – et non inversé – de la **chaîne respiratoire**).

▲ FIGURES **multiples à combiner**. Métabolisme d'ensemble et chaîne de transports d'électrons chez *Nitrobacter*.

Bilan (adapté du programme)

✓ Dans le cas des **bactéries nitratantes** 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 *Nitrobacter*

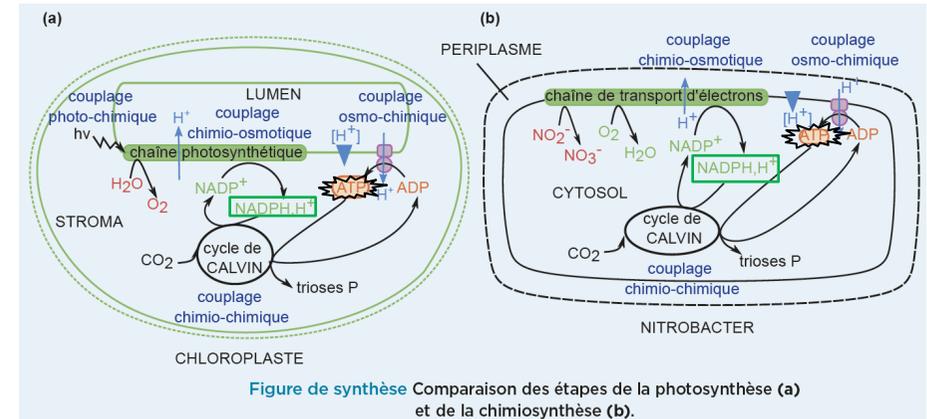


Figure de synthèse Comparaison des étapes de la photosynthèse (a) et de la chimiosynthèse (b).

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

Photosynthèse des Angiospermes

Chimiosynthèse de *Nitrobacter*

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

Caractéristique	Photosynthèse (Angiospermes)	Chimiosynthèse (<i>Nitrobacter</i>)
Localisation du cycle de CALVIN		
Source de carbone inorganique		
Localisation de la CTE		
Donneur initial d'électrons = sources d'électrons		
Accepteur primaire d'électrons		
Accepteur final d'électrons		
Source d'énergie		

CHAÎNE DE TRANSFERTS D'ÉLECTRONS

POTENTIELS REDOX DANS LA CHAÎNE PHOTOSYNTHÉTIQUE



Photosynthèse des Angiospermes

CHAÎNE DE TRANSFERTS D'ÉLECTRONS BIDIRECTIONNELLE

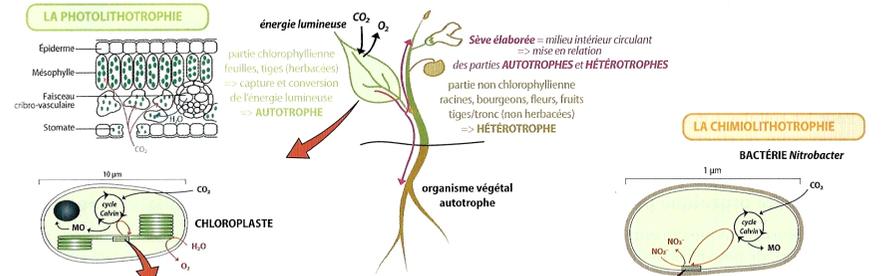
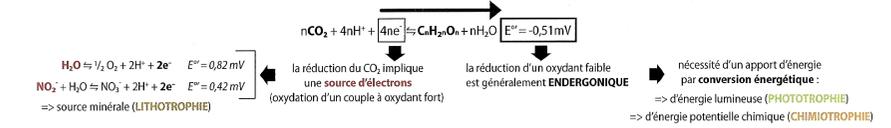


Chimiosynthèse de Nitrobacter

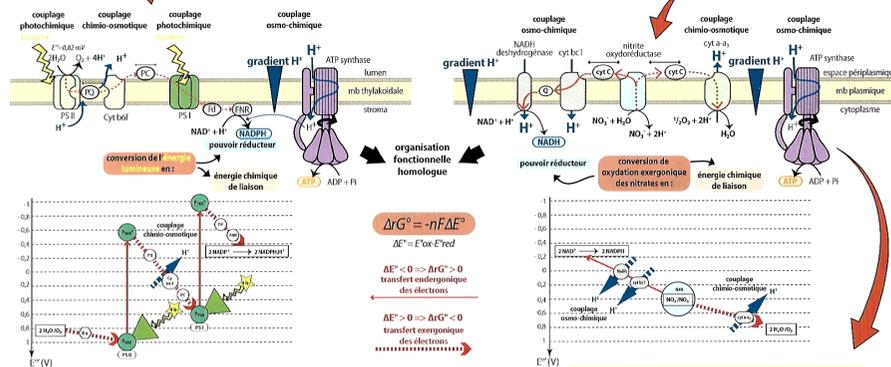
▲ FIGURE 80. Comparaison des chaînes de transfert d'électrons (CTE) d'une Angiosperme et de Nitrobacter, et de leurs diagrammes énergétiques respectifs en versions simplifiées.

D'après DAUTEL et al. (2021).

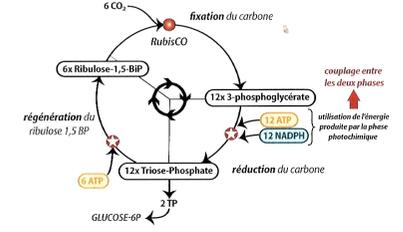
AUTOTROPHIE AU CARBONE = RÉDUCTION DU CO₂



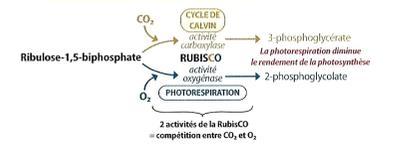
POTENTIEL REDOX DE LA CHAÎNE DE TRANSFERTS D'ÉLECTRONS



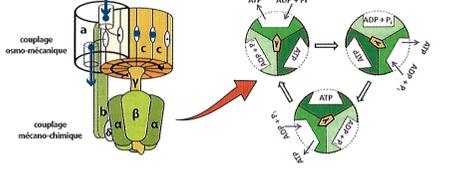
LE CYCLE DE CALVIN : RÉDUCTION DU CO₂



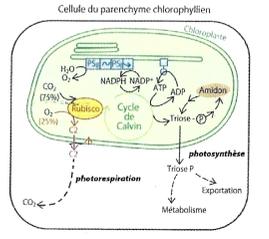
DUALITÉ FONCTIONNELLE DE LA RUBISCO



L'ATP SYNTHASE : COUPLAGE OSMO-CHIMIQUE



DEVENIR DES PRODUITS DE LA PHOTOSYNTHESE



▲ 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

Hétérotrophie :

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

Absorbotrophie :

Ex. 'champignons'

Phagotrophie :

Ex. Métazoaires

Le terme « osmotrophie » est parfois aussi employé comme **synonyme de l'absorbotrophie** mais certains auteurs lui donnent une **définition plus restrictive**. Je fais le choix de ne pas retenir ce **mot équivoque**.

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

Digestion au sens large :

Digestion au sens strict :

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

Cas **des** glucides, notamment du **glucose** :

-

-

-

-

▲ **FIGURE 82. Digestion et absorption des glucides : une vision simple.**

Seul l'exemple du glucose est exigible.

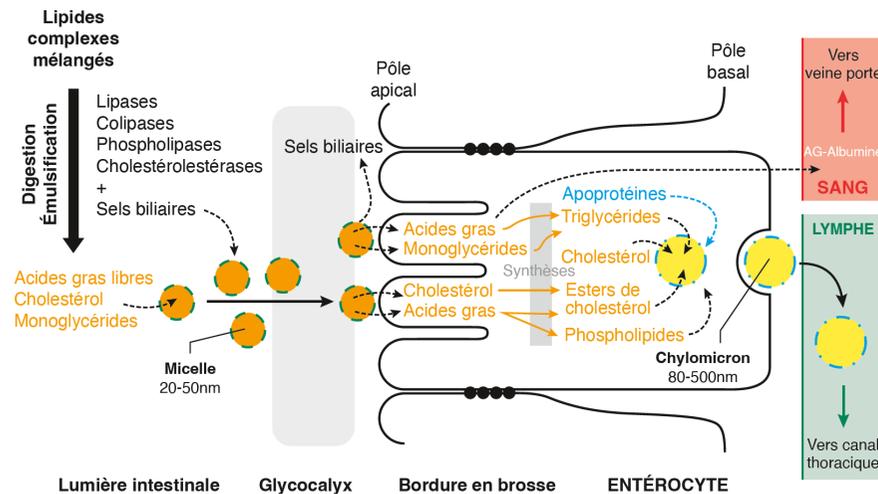
D'après SEGARRA, PIÈTRE *et al.* (2023).

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

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

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

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

5. Bilan

Assimilation :

▲ FIGURE 85. Approvisionnement en matière organique chez les Mammifères : vue d'ensemble. D'après SEGARRA, PIÈTRE *et al.* (2021).

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.

Pour faire une fiche de révision : quelques pistes

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

- **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^e édition française).
- AUGÈRE, B. (2001). *Les enzymes, biocatalyseurs protéiques*. Ellipses, Paris.
- BAL, A., C. CALAMAND, C. COTTON, G. GOHAU, M. LE BELLÉGAR, 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^e édition 1999). Elsevier, Amsterdam.
- BERGERON, J. (dir.), P. BEAUJARD, B. DAVID, A. HYON, I. BEDNAREK-MAITREPIERRE, 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. RAGUÈNES-NICOL (2015). *Biologie cellulaire et moléculaire. Tout le cours en fiches. Licence. PACES. CAPES*. 2^e édition (1^e 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^e 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. LACHAÎNE*. 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.
- DELAIRÉ-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^{er} édition 1999). Elsevier, Amsterdam.
- GODINOT, C., H. MOREAU, M. PAULHIAC-PISON & F. TEJEDOR (2010). *Biologie-Géologie 1^{er} année BCPST-véto*. Tec & Doc, Lavoisier, Paris.
- LAFFON, 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. JUSSERAND, P. PILLOT, S. RABOUIN & A. VAREILLE (2011). *Sciences de la Vie et de la Terre 1^{er} 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. LACHAÎNE.
- MARIEB, E. N. & K. HOEHN (2015). *Anatomie et physiologie humaines*. Pearson, Montréal (Québec, Canada), 9^e édition américaine adaptée par L. MOUSSAKOVA & R. LACHAÎNE.
- MEYER, S., C. REEB & R. BOSDEVEIX (2008). *Botanique. Biologie et physiologie végétales*. Maloine, Paris, 2^e édition (1^{er} édition 2004).
- MEYER, S., C. REEB & R. BOSDEVEIX (2019). *Botanique. Biologie et physiologie végétales*. Maloine, Paris, 3^e édition (1^{er} 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^{er} année*. Dunod, Paris, 2^e édition (2009), réimpression corrigée (2010) (1^{er} 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^{er} 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^{er} année*. Dunod, Paris, 3^e édition (1^{er} 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^{er} 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^{er} 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^{er} 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^{er} édition 1982).
- RIEUTORT, M. (1999). *Physiologie animale. 2. Les grandes fonctions*. Mise à jour D. PICHARD. Masson, Paris, 2^e édition (1^{er} édition 1982).
- SAINTPIERRE, F., C. BORDI (dir.), M. ALGRAIN, Y. KRAUSS, I. MOLLIÈRE & H. CLAUCE (2017). *Mémento Biologie BCPST 1^{er} et 2^e années*. Vuibert, Paris.
- SAINTPIERRE, F., C. BORDI (dir.), M. ALGRAIN-PITAVY, A. DENIS, L. GERAY & I. MOLLIÈRE (2021). *Mémento Biologie BCPST 1^{er} et 2^e années*. Vuibert, Paris, 2^e édition (1^{er} édition 2017).
- SEGARRA, J. (dir.), É. CHAUVET, C. COLSON-PROCH, M. HUILLE, M. LABROUSSE, F. LOUET, F. METZ & E. PIÈTRE (2014). *Biologie BCPST 1^{er} 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. SONTTHONNAX (2023). *BCPST 1^{er} 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^{er} 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. DOMENJOU].
- 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^{er} 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	2
A. La diversité des formes d'énergie mises en jeu chez les êtres vivants	2
B. L'énergie de GIBBS et le caractère endergonique ou exergonique d'une réaction chimique	2
C. La nécessité de couplages énergétiques dans les cellules	2
D. L'origine environnementale – organique ou minérale – de l'énergie employée par les êtres vivants	3
1. L'environnement, un ensemble de ressources... pas forcément biodisponibles	3
2. Les grands types métaboliques (= types trophiques)	3
a. En fonction de la source d'énergie : phototrophes (source : lumière) vs. chimiotrophes (source : oxydation de matière)	3
b. En fonction de la source de carbone : autotrophes au carbone (source : CO ₂) vs. hétérotrophes au carbone (source : matière organique pré-existante)	3
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	4
F. L'importance métabolique de la compartimentation cellulaire	4
1. La compartimentation, une caractéristique permettant la séparation des milieux réactionnels et ainsi la spécialisation métabolique des volumes cellulaires	4
2. Panorama des principales réactions de catabolisme et d'anabolisme dans les cellules eucaryotes	4
3. Un métabolisme en « réseau » (notion de carte métabolique) où les voies sont interconnectées	5
4. La présence de molécules carrefours, des points de convergence de plusieurs voies métaboliques (exemples du pyruvate et de l'acétyl-CoA)	5
G. Les trois principales formes d'énergie directement utilisables dans les activités cellulaires	5
1. L'emploi de pouvoir réducteur (énergie chimique) : réactions d'oxydoréduction et importance des coenzymes d'oxydoréduction	5
2. L'utilisation de gradients chimiques ou électrochimiques membranaires (énergie osmotique)	6
3. L'utilisation de nucléosides triphosphates, notamment l'ATP (énergie chimique)	6
4. Proposition de bilan	6
H. Un positionnement métabolique central de l'ATP	6
1. L'ATP, molécule dont l'hydrolyse est fortement exergonique	6
a. Un nucléoside triphosphate	6
b. Une molécule à haut potentiel d'hydrolyse des liaisons anhydride phosphorique, libérant plus de 30 kJ • mol ⁻¹ en conditions standard	7
c. Un potentiel d'hydrolyse néanmoins intermédiaire parmi les molécules de transfert de groupement phosphate	7
2. L'ATP, molécule régénérable par divers processus	7
a. Trois modalités de régénération	7
α. La phosphorylation oxydative, un couplage globalement chimiochimique permis par la chaîne respiratoire et l'ATP synthase	7
β. La photophosphorylation, un couplage globalement photochimique permis par la chaîne photosynthétique et l'ATP synthase	7

γ. La phosphorylation au niveau du substrat (= transphosphorylation), un couplage chimiochimique où le phosphate est transféré d'une molécule phosphorylée vers l'ADP	7
δ. Bilan	7
b. Les voies métaboliques impliquant la régénération d'ATP	7
c. Le rôle central des ATP synthases (= sphères pédonculées)	8
α. Un complexe enzymatique très répandu dans le monde vivant et comprenant de multiples sous-unités	8
β. Localisation des sphères pédonculées dans les organites semi-autonomes	8
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)	8
δ. Le fonctionnement séquentiel de l'ATP synthase	8
ε. L'essentiel : que retenir au minimum ?	8
3. L'ATP, une molécule aux multiples usages dans la cellule	9
a. Une molécule source d'énergie de nombreuses activités cellulaires	9
α. La synthèse de molécules organiques variées et de polymères : travaux chimiques (couplage chimio-chimique)	9
β. Le déplacement de compartiments et le mouvement : travaux mécaniques (couplage chimio-mécanique)	9
γ. Le déplacement transmembranaire d'une substance contre son gradient chimique ou électrochimique : travaux osmotiques (couplage chimio-osmotique)	9
a. Autres usages cellulaires de l'ATP	9
α. Un nucléotide polymérisable en ARN (voire ADN)	9
β. Un précurseur de l'AMPc, un second messenger	9
γ. Une molécule de contrôle du métabolisme	9
i. Un contrôle direct inhibiteur ou activateur de l'activité enzymatique	9
ii. Une participation au contrôle par modification covalente des enzymes	9

II. Le métabolisme autotrophe des cellules végétales : réduction du carbone d'origine minérale à la lumière	10
A. La plante, organisme constitué de tissus autotrophes et hétérotrophes, ce qui suppose des corrélations trophiques entre cellules	10
B. La réduction du CO₂ et la synthèse glucidique en présence de lumière : la photosynthèse en C3	10
1. Mise en évidence d'une synthèse de matière organique à la lumière en présence de dioxyde de carbone	10
a. Dégagement de dioxygène à la lumière et en présence de CO ₂	10
b. Production de matière organique carbonée à la lumière	11
c. L'importance d'un composé oxydé subissant une réduction lors des réactions à la lumière : l'expérience de HILL (1937)	11
d. La lumière et le CO ₂ comme facteurs limitants de la photosynthèse et la notion de point de compensation	11
2. La photosynthèse, une réduction du CO ₂ en matière organique au moyen de l'énergie lumineuse qui a lieu dans les chloroplastes	12
3. La phase photochimique de la photosynthèse : captation et conversion d'énergie lumineuse en ATP et pouvoir réducteur (couplage photochimique) au niveau des thylakoïdes	12
a. Des structures favorisant la captation de lumière : localisation du processus aux différentes échelles	12
α. À l'échelle de l'organe : la feuille, organe aplati et fin favorisant la captation de lumière	12
β. À l'échelle du tissu : la feuille, un organe riche en parenchyme chlorophyllien	12
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	13
δ. Des pigments riches en liaisons conjuguées dont le spectre d'absorption correspond au spectre d'action de la photosynthèse (incl. expérience d'ENGELMANN)	13

b. Des mécanismes permettant la conversion de l'énergie lumineuse en ATP et pouvoir réducteur (couplage globalement photochimique)	14	y. Devenir 2 : des électrons qui finissent acceptés par le NAD ⁺ réduit en NADH,H ⁺ dans le cadre d'une chaîne électronique « inversée »	22
a. Une conversion photochimique assurée par des photosystèmes (PS)	14	b. Aspects énergétiques	23
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	14	c. De l'ATP et du pouvoir réducteur essentiels au cycle de CALVIN où le CO ₂ est réduit en matière organique	23
ii. L'effet EMERSON (1957), une mise en évidence de l'existence de deux photosystèmes qui peuvent fonctionner isolément mais fonctionnement davantage en synergie	15	C. Comparaison de la photo-autotrophie des Angiospermes et la chimio-autotrophie de Nitrobacter	24
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)	15	IV. Un prélèvement de matière organique déjà existante dans le milieu : l'hétérotrophie	26
i. Diversité des composants de la chaîne photosynthétique et diagrammes énergétiques : notions de trajet acyclique (= schéma en Z) et de trajet cyclique	15	A. Deux modalités principales : l'absorbotrophie (ex. 'champignons') et la phagotrophie (ex. Métazoaires)	26
ii. Une répartition des composés transmembranaires thylakoïdiens qui varie entre zones granaires et agraires	16	B. L'exemple des Mammifères, organismes phagotrophes	26
iii. Résultat du fonctionnement de la chaîne photosynthétique : production de pouvoir réducteur et d'un gradient de protons	16	1. Une matière organique simplifiée par la digestion à partir de portions d'organismes vivants ingérés	26
γ. Un gradient de protons utilisé dans la synthèse d'ATP par l'ATP synthase : la photophosphorylation (couplage osmo-chimique)	16	2. Une matière organique typiquement prélevée au niveau intestinal (ou au niveau d'autres tronçons) après digestion	26
c. Bilan de la phase photochimique	17	3. Une matière organique transportée par les systèmes circulatoires (sanguin et lymphatique)	27
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)	17	4. Une matière organique entrant dans les cellules consommatrices par des transporteurs spécifiques (ou une endocytose)	27
a. Les expériences de CALVIN (avec BENSON et BASSHAM) et la mise en évidence des réactions de la phase chimique	17	5. Bilan	27
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	17	Pour faire une fiche de révision : quelques pistes	28
c. La dualité carboxylase-oxydase de la RuBisCO et la photorespiration	18	Références	28
α. Mise en évidence de la compétition entre dioxygène et dioxyde de carbone sur la rubisco : l'effet WARBURG (1919-1920)	18	Plan du chapitre	30
β. Mécanismes de la photorespiration : une coopération chloroplaste-péroxyso-mitocondrie	18	Plan simplifié du chapitre (3 niveaux)	32
γ. Bilan et conséquences biologiques de la photorespiration	18	Plan très simplifié du chapitre (2 niveaux)	33
5. Vision synthétique de la photosynthèse et couplage des phases photochimique et chimique	19		
C. Des modalités particulières de fixation du CO₂ chez les plantes à photosynthèse en C4 et photosynthèse de type CAM [pour information]	20		
D. Importance écosystémique de la photosynthèse : quelques remarques	20		
III. Le métabolisme autotrophe de Nitrobacter, Bactérie nitratante puisant dans le milieu énergie chimique et matière minérale	21		
A. La nitratation, un processus qui s'inscrit dans le cycle de l'azote	21		
1. Un cycle de l'azote simplifié	21		
a. Un cycle largement dû à des réactions d'oxydoréduction	21		
b. Transferts et réservoirs du cycle de l'azote	22		
2. La nitratation, une étape de la nitrification (= nitrosation + nitratation) dans les sols ou les milieux aquatiques	22		
B. Modalités et mécanismes de la nitratation chez Nitrobacter	22		
a. Une chaîne de transport d'électrons qui produit, d'un côté de l'ATP, et de l'autre du pouvoir réducteur (NADH,H ⁺)	22		
α. Une oxydation des nitrites en nitrates qui libère des électrons et de l'énergie	22		
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	22		

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	2
A. La diversité des formes d'énergie mises en jeu chez les êtres vivants	2
B. L'énergie de GIBBS et le caractère endergonique ou exergonique d'une réaction chimique	2
C. La nécessité de couplages énergétiques dans les cellules	2
D. L'origine environnementale – organique ou minérale – de l'énergie employée par les êtres vivants	3
1. L'environnement, un ensemble de ressources... pas forcément biodisponibles	3
2. Les grands types métaboliques (= types trophiques)	3
E. Le rôle central des enzymes dans la réalisation et le contrôle des réactions chimiques du vivant	4
F. L'importance métabolique de la compartimentation cellulaire	4
1. La compartimentation, une caractéristique permettant la séparation des milieux réactionnels et ainsi la spécialisation métabolique des volumes cellulaires	4
2. Panorama des principales réactions de catabolisme et d'anabolisme dans les cellules eucaryotes	4
3. Un métabolisme en « réseau » (notion de carte métabolique) où les voies sont interconnectées	5
4. La présence de molécules carrefours, des points de convergence de plusieurs voies métaboliques (exemples du pyruvate et de l'acétyl-CoA)	5
G. Les trois principales formes d'énergie directement utilisables dans les activités cellulaires	5
1. L'emploi de pouvoir réducteur (énergie chimique) : réactions d'oxydoréduction et importance des coenzymes d'oxydoréduction	5
2. L'utilisation de gradients chimiques ou électrochimiques membranaires (énergie osmotique)	6
3. L'utilisation de nucléosides triphosphates, notamment l'ATP (énergie chimique)	6
4. Proposition de bilan	6
H. Un positionnement métabolique central de l'ATP	6
1. L'ATP, molécule dont l'hydrolyse est fortement exergonique	6
2. L'ATP, molécule régénérable par divers processus	7
3. L'ATP, une molécule aux multiples usages dans la cellule	9
II. Le métabolisme autotrophe des cellules végétales : réduction du carbone d'origine minérale à la lumière	10
A. La plante, organisme constitué de tissus autotrophes et hétérotrophes, ce qui suppose des corrélations trophiques entre cellules	10
B. La réduction du CO ₂ et la synthèse glucidique en présence de lumière : la photosynthèse en C3	10
1. Mise en évidence d'une synthèse de matière organique à la lumière en présence de dioxyde de carbone	10
2. La photosynthèse, une réduction du CO ₂ en matière organique au moyen de l'énergie lumineuse qui a lieu dans les chloroplastes	12
3. La phase photochimique de la photosynthèse : captation et conversion d'énergie lumineuse en ATP et pouvoir réducteur (couplage photochimique) au niveau des thylakoïdes	12
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)	17

5. Vision synthétique de la photosynthèse et couplage des phases photochimique et chimique	19
C. Des modalités particulières de fixation du CO₂ chez les plantes à photosynthèse en C4 et photosynthèse de type CAM [pour information]	20
D. Importance écosystémique de la photosynthèse : quelques remarques	20
III. Le métabolisme autotrophe de <i>Nitrobacter</i>, Bactérie nitrifiante puisant dans le milieu énergie chimique et matière minérale	21
A. La nitrification, un processus qui s'inscrit dans le cycle de l'azote	21
1. Un cycle de l'azote simplifié	21
2. La nitrification, une étape de la nitrification (= nitrosation + nitrification) dans les sols ou les milieux aquatiques	22
B. Modalités et mécanismes de la nitrification chez <i>Nitrobacter</i>	22
C. Comparaison de la photo-autotrophie des Angiospermes et la chimio-autotrophie de <i>Nitrobacter</i>	24
IV. Un prélèvement de matière organique déjà existante dans le milieu : l'hétérotrophie	26
A. Deux modalités principales : l'absorbotrophie (ex. 'champignons') et la phagotrophie (ex. Métazoaires)	26
B. L'exemple des Mammifères, organismes phagotrophes	26
1. Une matière organique simplifiée par la digestion à partir de portions d'organismes vivants ingérés	26
2. Une matière organique typiquement prélevée au niveau intestinal (ou au niveau d'autres tronçons) après digestion	26
3. Une matière organique transportée par les systèmes circulatoires (sanguin et lymphatique)	27
4. Une matière organique entrant dans les cellules consommatrices par des transporteurs spécifiques (ou une endocytose)	27
5. Bilan	27
Pour faire une fiche de révision : quelques pistes	28
Références	28
Plan du chapitre	30
Plan simplifié du chapitre (3 niveaux)	32
Plan très simplifié du chapitre (2 niveaux)	33

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	2
A. La diversité des formes d'énergie mises en jeu chez les êtres vivants	2
B. L'énergie de GIBBS et le caractère endergonique ou exergonique d'une réaction chimique	2
C. La nécessité de couplages énergétiques dans les cellules	2
D. L'origine environnementale – organique ou minérale – de l'énergie employée par les êtres vivants	3
E. Le rôle central des enzymes dans la réalisation et le contrôle des réactions chimiques du vivant	4
F. L'importance métabolique de la compartimentation cellulaire	4
G. Les trois principales formes d'énergie directement utilisables dans les activités cellulaires	5
H. Un positionnement métabolique central de l'ATP	6
II. Le métabolisme autotrophe des cellules végétales : réduction du carbone d'origine minérale à la lumière	10
A. La plante, organisme constitué de tissus autotrophes et hétérotrophes, ce qui suppose des corrélations trophiques entre cellules	10
B. La réduction du CO ₂ et la synthèse glucidique en présence de lumière : la photosynthèse en C3	10
C. Des modalités particulières de fixation du CO ₂ chez les plantes à photosynthèse en C4 et photosynthèse de type CAM [pour information]	20
D. Importance écosystémique de la photosynthèse : quelques remarques	20
III. Le métabolisme autotrophe de <i>Nitrobacter</i>, Bactérie nitrifiante puisant dans le milieu énergie chimique et matière minérale	21
A. La nitrification, un processus qui s'inscrit dans le cycle de l'azote	21
B. Modalités et mécanismes de la nitrification chez <i>Nitrobacter</i>	22
C. Comparaison de la photo-autotrophie des Angiospermes et la chimio-autotrophie de <i>Nitrobacter</i>	24
IV. Un prélèvement de matière organique déjà existante dans le milieu : l'hétérotrophie	26
A. Deux modalités principales : l'absorbotrophie (ex. 'champignons') et la phagotrophie (ex. Métazoaires)	26
B. L'exemple des Mammifères, organismes phagotrophes	26
Pour faire une fiche de révision : quelques pistes	28
Références	28
Plan du chapitre	30
Plan simplifié du chapitre (3 niveaux)	32
Plan très simplifié du chapitre (2 niveaux)	33

© 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.