Document téléchargeable sur le site
https://www.svt-tanguy-jean.com/

Lycée Valentine LABBÉ
41 rue Paul DOUMER – BP 20226
59563 LA MADELEINE CEDEX
CLASSE PRÉPARATOIRE TB
(Technologie & Biologie)

ENSEIGNEMENT DE SCIENCES DE LA VIE ET DE LA TERRE (SVT)
°° SCIENCES DE LA VIE °°

Partie 1. Organisation fonctionnelle de la cellule eucaryote
>> Cours <<

Chapitre 5 : proposition de fiche à compléter

Dynamiques métaboliques des cellules eucaryotes

Objectifs : extraits du programme

Connaissances clefs à construire	Commentaires, capacités exigibles
1.4 Dynamiques métaboliques des cellules eucaryotes La cellule eucaryote est le siège de nombreuses réactions de catabolisme et d'anabolisme. L'ATP véhicule l'énergie nécessaire aux réactions. Elle est produite par couplage chimio-chimique ou par couplage osmo-chimique au niveau des ATP synthases. Des molécules carrefours permettent une interconnexion entre les différentes voies.	**Lien Biotechnologies** : 3.1.2 - justifier la place de l'ATP en tant que molécule énergétique universelle - commenter un panorama des grandes voies métaboliques d'une cellule eucaryote. - établir la relation entre une voie métabolique et ses caractéristiques (sa localisation, son rendement, sa vitesse). - identifier une molécule carrefour et établir ses caractéristiques.
La cellule musculaire striée squelettique consomme une grande quantité d'ATP. Sa régénération met en jeu différentes voies possibles, en lien avec le type cellulaire et les conditions d'approvisionnement du tissu. En fin d'exercice, la cellule revient à son état initial (dette en O2).	- à partir de l'exemple de la cellule musculaire striée squelettique, montrer le lien entre l'activité de la cellule et les voies cataboliques utilisées (restreintes à l'utilisation d'un stock énergétique, la glycolyse, la respiration mitochondriale et une fermentation). - établir le lien entre la voie métabolique et l'utilisation du dioxygène. - décrire le retour aux conditions initiales après un exercice musculaire.
De jour, la cellule végétale convertit l'énergie lumineuse en énergie chimique exploitée pour produire de la matière organique stockée et exportée. Elle réalise simultanément un catabolisme oxydatif et des synthèses diverses. À l'obscurité, la cellule chlorophyllienne adopte un comportement hétérotrophe. L'amidon stocké dans les chloroplastes est dégradé.	- distinguer les types trophiques des cellules d'un organisme végétal. Limite : étude de l'autotrophie vis-à-vis du carbone - à partir de l'exemple d'une cellule végétale chlorophyllienne, construire un schéma bilan du métabolisme de la cellule selon les conditions d'éclairement (jour / nuit). **Lien** : 2.4.1 [chapitre 11. Les Angiospermes, organismes autotrophes à vie fixée], Travaux pratiques [1.4. Étude pratique de la photosynthèse]

Introduction

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 :

- catabolisme :

***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**)

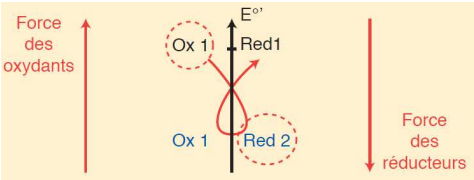
Comment s'opèrent les principales réactions métaboliques dans les cellules eucaryotes ?

Encadré A Rappels sur l'oxydoréduction

***Réduction** = **gain** d'électrons*
*(plutôt **endergonique**)*

$$Ox + n\,e^- \rightleftharpoons Red$$

***Oxydation** = **perte** d'électrons*
*(plutôt **exergonique**)*



I. Quelques notions préliminaires sur le fonctionnement énergétique et métabolique des cellules

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 **$\Delta G^{0'}$** 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

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

Autotrophie / Lithotrophie :
Hétérotrophie / Organotrophie :

TABLEAU I. Les principaux types métaboliques. D'après BREUIL (2007).
Ont été mis en évidence les types métaboliques caractérisant les eucaryotes.

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

→ Biotechnologies

Enzyme :

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

-

-

-

-

F. La cellule eucaryote, une cellule compartimentée où se déroulent de nombreuses réactions anaboliques et cataboliques

Capacités exigibles	✓ **Commenter** un panorama des grandes voies métaboliques d'une cellule eucaryote. ✓ **Identifier** une molécule carrefour et établir ses caractéristiques.

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

FIGURE 4. Compartimentation cellulaire et répartition des voies métaboliques : un panorama dans le cas d'une cellule animale [*pour illustration*]. D'après RICHARD *et al.* (2015)

FIGURE 5. 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

Carte métabolique :

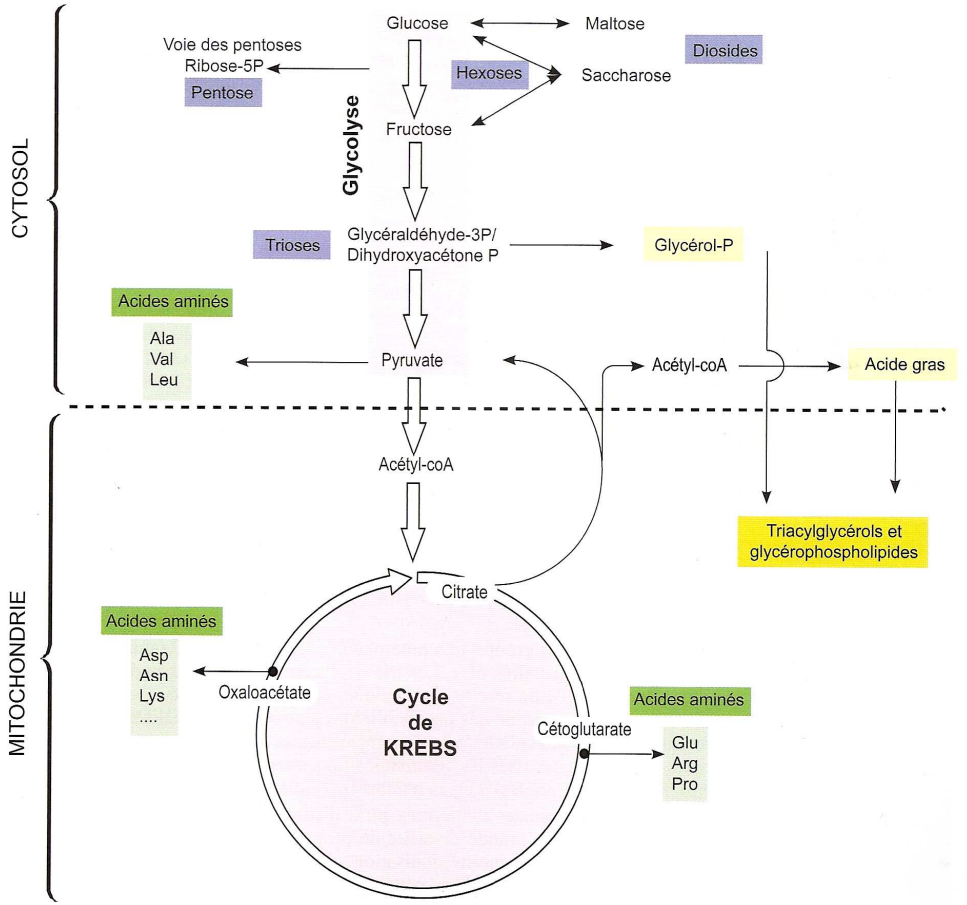


FIGURE 7. Exemples de parentés biochimiques existant entre petites molécules organiques (pour information). D'après CAMPBELL *et al.* (2012).

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

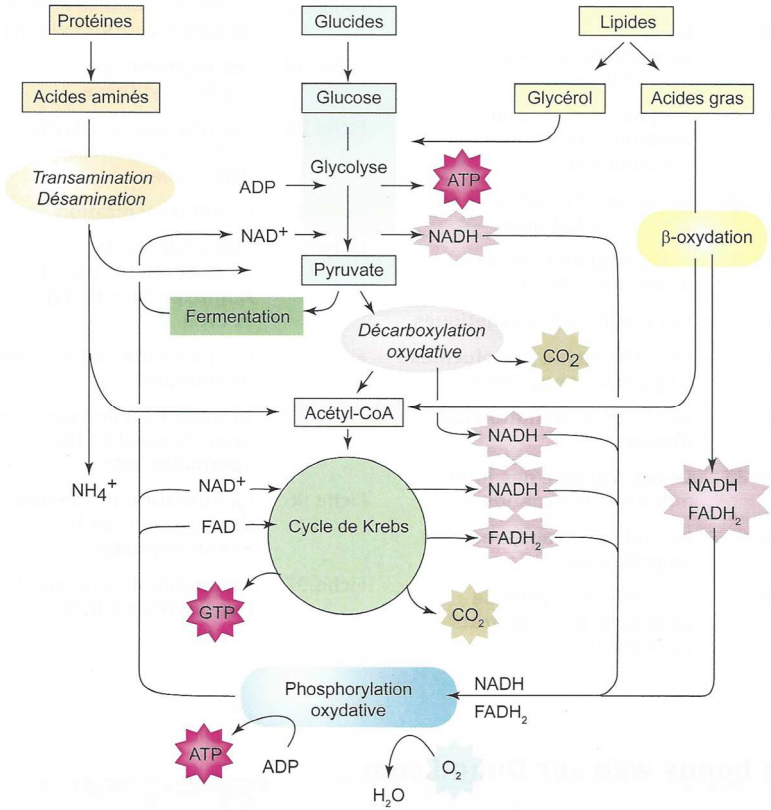


FIGURE 8. Panorama du catabolisme des cellules eucaryotes. D'après RICHARD *et al.* (2015)

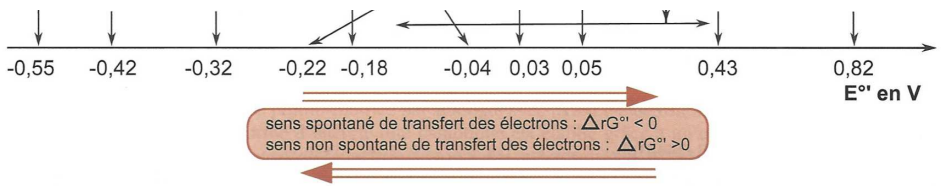
Bilan (adapté du programme)	✓ La **cellule eucaryote** est le siège de nombreuses réactions de **catabolisme** et d'**anabolisme**. ✓ Des **molécules carrefours** permettent une **interconnexion** entre les **différentes voies**.

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

D'après PEYCRU *et al. (2013) (à compléter)*

➲ ***Quelques valeurs de E°' rencontrés en biologie***



Échelle des valeurs du potentiel redox standard E°' de quelques couples (les coenzymes sont représentés en marron).

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** :
-

-

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 9. Trois coenzymes d'oxydoréduction [*pour information ?*].
D'après PEYCRU *et al.* (2013) – *à dessiner au moins une fois*

FIGURE 10. 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

Capacité exigible	✓ **Justifier** la place de l'ATP en tant que molécule énergétique universelle.

ATP =

Concentration cytosolique :

Renouvellement :

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

a. Un nucléoside triphosphate

FIGURE 12. L'ATP (adénosine triphosphate) : proposition de schéma simplifié.
Schéma original dans la correction. À produire par les étudiants.
MAJEUR !

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 ΔrG°'** de son hydrolyse est **supérieure à 25 kJ • mol^{-1}**.*

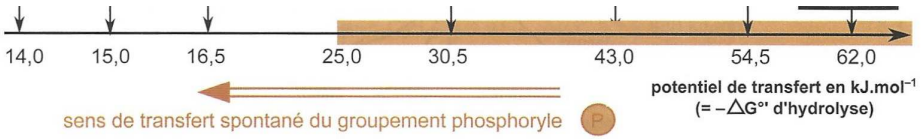
- Notez que l'**hydrolyse** ***au sens le plus strict*** d'une **liaison anhydride phosphorique**, c'est-à-dire sa ***rupture par l'attaque d'une molécule d'eau***, est plutôt **rare** dans la réalité ; « l'hydrolyse » de l'ATP est en réalité le **bilan** d'une réaction en deux temps.
- La plupart du 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 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	ΔrG°' 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	
ATP → ADP + Pi	−30,5			
Glucose 1-phosphate	−20,9	Liaisons à faible potentiel d'hydrolyse		
Fructose 6-phosphate	−13,8			
Glucose 6-phosphate	−13,8		Faible	



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

FIGURE 13. Échelle de potentiels d'hydrolyse de quelques molécules biologiques.
Notez la position intermédiaire de l'ATP.
D'après PEYCRU *et al.* (2013)

2. L'ATP, molécule régénérable par divers processus

a. Trois modalités de régénération

Encadré D ***Les ATP synthases = ATP synthétases = sphères pédonculées, des complexes enzymatiques couplant un gradient de protons et la production d'ATP***

Point important : mot-clef du programme…

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

ATP synthétase =

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

➲ ***Mise en évidence de l'importance de la force proton-motrice dans le fonctionnement de l'ATP synthase (JAGENDORF & URIBE, 1966)***

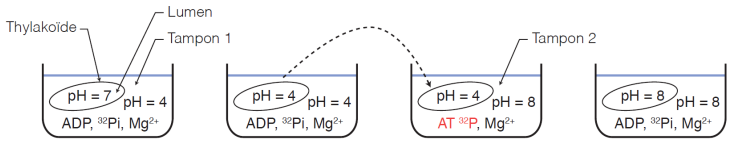
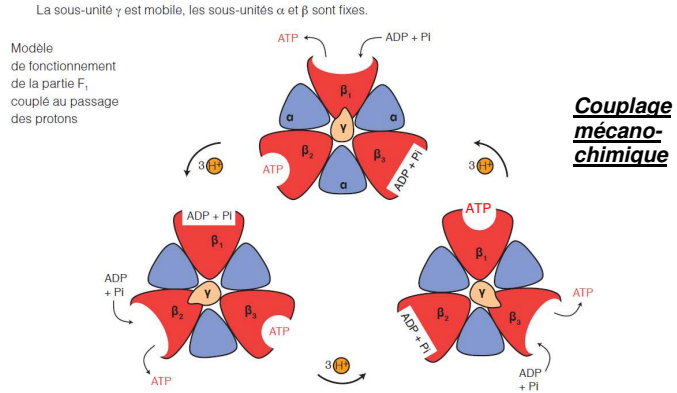


FIGURE c. Simplification des expériences de JAGENDORF & URIBE (1966).
D'après SEGARRA *et al.* (2014).

➲ ***Le fonctionnement séquentiel de l'ATP synthase***

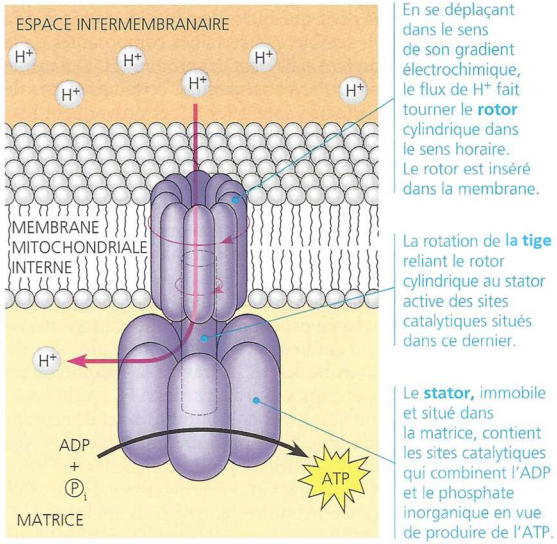


Couplage mécano-chimique

FIGURE d. 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.

Bien retenir
- **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**)



L'ATP synthétase, une turbine moléculaire. Le complexe protéique formé par l'ATP synthétase fonctionne à la manière d'une turbine alimentée par un flux de protons. Cette enzyme se retrouve dans la membrane des mitochondries et des chloroplastes eucaryotes, et dans la membrane plasmique des procaryotes. Elle se compose d'un rotor, d'un arbre et d'un stator, chaque partie étant constituée de plusieurs sous-unités protéiques.

[CAMPBELL & REECE, 2004]

*NB **Gradient de protons** établi grâce à une **chaine d'oxydoréduction**.*

FIGURES e + f (à grouper). L'ATP synthase dans les organites semi-autonomes.

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

FIGURE 16. Modalités de phosphorylation d'ADP en ATP dans une cellule eucaryote.
D'après SEGARRA *et al.* (2014).

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.

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

FIGURE 17. 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, cytoses), contraction musculaire, flagelle…*

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

= **Transport actif primaire**

b. Autres usages cellulaires de l'ATP

α. Un nucléotide polymérisable en ARN (voire ADN)

ATP →
-

-

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

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

Bilan (adapté du programme)	✓ L'**ATP** véhicule l'**énergie** nécessaire à la plupart des **réactions** et **travaux cellulaires**. ✓ Elle est **produite** par **couplage chimio-chimique** (phosphorylation au niveau du substrat) ou par **couplage osmo-chimique** au niveau des **ATP synthases**.

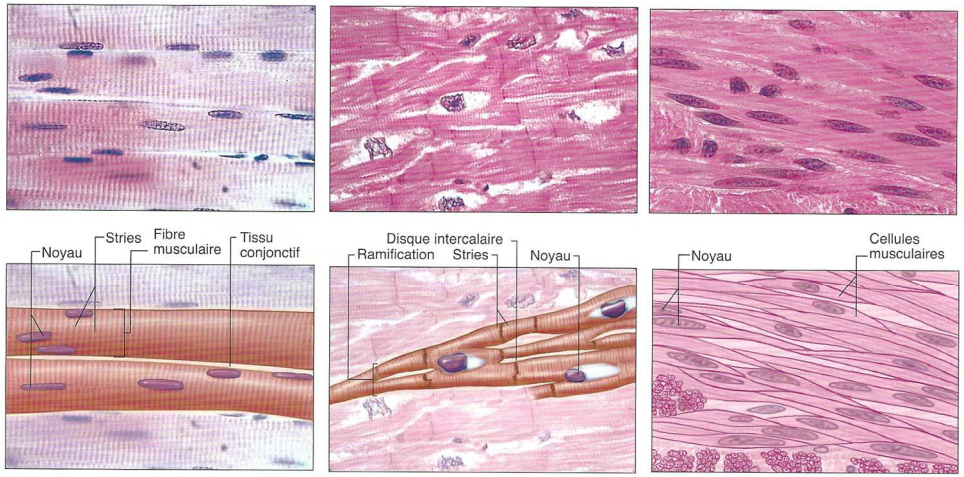
II. L'oxydation des molécules organiques et la production d'ATP : le catabolisme oxydatif étudié dans le contexte de la cellule musculaire striée squelettique

A. La cellule musculaire striée squelettique, un exemple de cellule à haute consommation d'ATP

Cette partie comprend des **rappels** et **compléments** par rapport aux chapitre 1 (Cellules eucaryotes) (la **cellule musculaire** était un exemple de **cellule hautement différenciée**) et 9 (Respiration) (Myoglobine)

Encadré E Les trois types de muscles : une vision illustrée

D'après VANDER et al. (2013)



a) Muscle squelettique **b)** Muscle cardiaque **c)** Muscle lisse

Comparaison des muscles a) squelettique, b) cardiaque et c) lisse, observés en microscopie optique (en haut) et représentés sous forme schématique (en bas). Les muscles cardiaques et squelettiques ont un aspect strié. Les cellules des muscles cardiaque et lisse tendent à n'avoir qu'un noyau, alors que les fibres musculaires squelettiques sont multinucléées.

Le **muscle cardiaque** et les **muscles lisses** sont abordés dans les chapitres concernés.

Muscles striés squelettiques :
Muscle strié cardiaque :
Muscles lisses :

1. Les muscles squelettiques, organes arrimés au squelette dont ils déplacent les segments les uns par rapport aux autres par leur contraction

a. Les muscles, des organes ancrés aux os par des structures conjonctives résistantes nommées tendons

Articulation :
Tendon :

- Attachements conjonctifs des os : **ligaments**
- Fluide visqueux lubrifiant entre les os : **synovie**

b. Les muscles, des organes dont la contraction assure un déplacement rectiligne d'une partie du corps par rapport à une autre (mouvement)

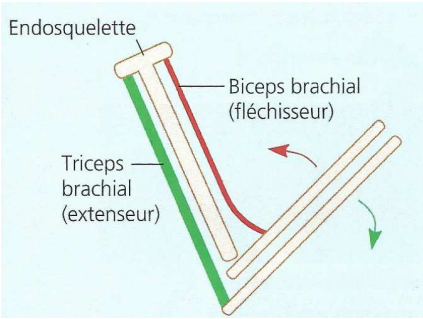


FIGURE 20. Les mouvements assurés par deux muscles antagonistes : le fléchisseur du bras et son extenseur. D'après CAMPBELL & REECE (2004).

Mouvement :

- Un **mouvement assuré** par un **muscle squelettique** est **rectiligne** (= une direction)
- Le **muscle** exécutant le **mouvement opposé** est dit **antagoniste**

2. Une contractilité musculaire que se déploie à toutes les échelles

a. Un organe allongé composé de tissu conjonctif et de fibres musculaires rectilignes

Schéma	Description	Conjonctif
	Un muscle est constitué de centaines ou de milliers de cellules musculaires ainsi que de gaines de tissu conjonctif, de vaisseaux sanguins et de neurofibres.	Recouvert par l'épimysium
	Un faisceau de fibres est un assemblage de cellules musculaires, séparées du reste du muscle par une gaine de tissu conjonctif.	Recouvert par le périmysium
	Une fibre musculaire est une cellule multinucléée allongée; son apparence est striée.	Recouverte par l'endomysium

FIGURE 21. Le muscle, un ensemble de fibres musculaires. D'après MARIEB & HOEHN (2015).

b. Des fibres musculaires dont les myofibrilles peuvent se raccourcir

[**Relations structure-fonction** ♥]

- **Rectilignes**, très **longues** (jusqu'à 40 cm pour certaines, dans certains muscules) / **diamètre 20-100 µm**
- **Nombreux noyaux** : **syncitium** (= ***cellule multinucléée issue de la fusion de nombreuses cellules préexistantes***)
- **Cytosol** = **sarcoplasme** ; comprenant notamment des **myofibrilles***
  + richesse en **glycogène** (réserve), **enzymes glycolytiques** (production d'ATP) et **myoglobine** (captation d'O2)
- Présence de **réticulum sarcoplasmique (RS)** autour des **myofibrilles** : réservoir de **calcium** (rôle de **calciosome**)
- **Membrane plasmique** = **sarcolemme** ; présence de **tubules T** (transverses) proches du RS → apport du **potentiel d'action musculaire** ⇒ **libération de calcium** par le **RS** ⇒ **contraction**
- Abondantes **mitochondries** (respiration cellulaire : production d'ATP)

Myofibrille :

Le **sarcoplasme** est en outre riche en **glycogène** (réserve glucidique utilisée lors de l'effort), en **enzymes glycolytiques** permettant la **production d'énergie** et souvent en **myoglobine** qui facilite la **captation de dioxygène sanguin**.

Encadré F L'origine de la structure syncytiale des fibres musculaires

Rappels des chapitres 1 et 17

➢ Les **fibres musculaires striées squelettiques** sont mises en place lors de **l'organogenèse** mais aussi **tout au long du développement** (et même de la **vie adulte**, lorsque des **fibres usagées** sont **remplacées** ou que de **nouvelles** sont **formées**). Lors du développement précoce, des **cellules mononucléées du myotome** (déterminées à donner du muscle) fusionnent en **myotubes *très longs et plurinucléés*** (donc **syncytiaux**) dont la **différenciation progressive** permettra de former des **fibres musculaires** (figure a).

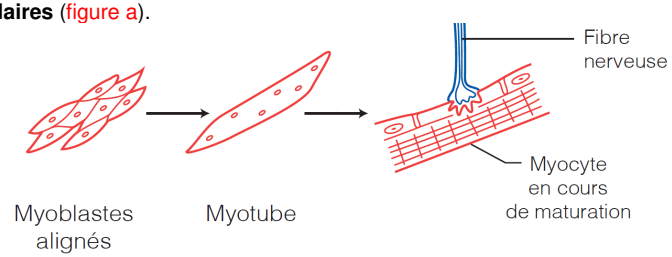


FIGURE a. Formation d'une fibre lors de l'organogenèse. D'après SEGARRA *et al.* (2014).

c. Des myofibrilles dont les unités de raccourcissement sont des sarcomères

Sarcomère :

>> **Myofilaments épais** de **myosine** + **myofilaments fins** d'**actine** <<

Stries Z → protéines **CapZ** (*stabilisation, ancrage des filaments fins*)
Titine = **connectine** (*liaison myosine / CapZ*)
Tropomoduline (*stabilisation des filaments d'actine*)
} **Relations structure-fonction** ♥

En **microscopie électronique** (figure 61) :
- **ligne Z** (de l'allemand *zwischen*, signifiant « **entre** ») = ligne foncée (limite de sarcomère).
- **bande I** (pour **isotrope**)
- **bande A** (pour **anisotrope**)
  >> **partie plus pâle** dans cette région : **zone H** (de l'allemand *heller*, **plus pâle**).
  >> incluse dans cette zone H : **ligne M** (de l'allemand *mittel*, **centre**)

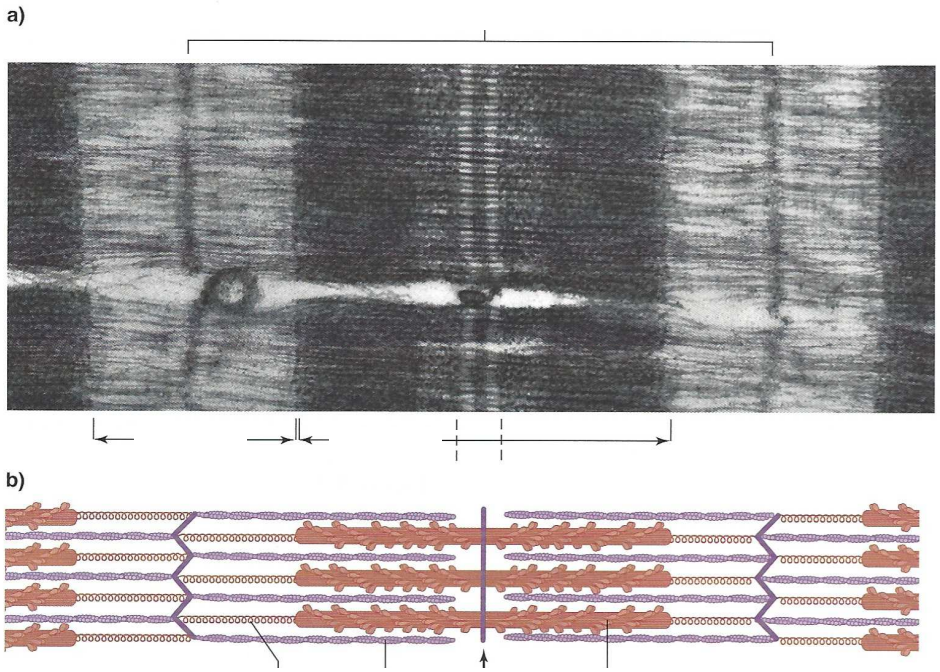


FIGURE 23. Allure d'un sarcomère en coupe longitudinale. *À compléter.* **a) Électronographie (MET). b) Interprétation.** D'après VANDER *et al.* (2013).

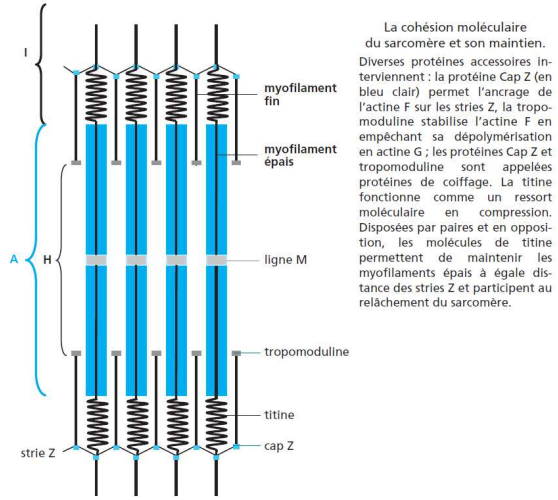


FIGURE 24. Organisation plus complète d'un sarcomère (avec un schéma pourtant simple ☺). D'après PEYCRU *et al.* (2010b).

À vous de jouer !	Comment s'organise le muscle à toutes les échelles ?	
Savoirs à construire	Schéma-bilan de l'organisation musculaire, de l'échelle macroscopique à l'échelle moléculaire	
Savoir-faire sollicités	**Capacité ou attitude visée**	**Évaluation**
	▪ Sélectionner des informations utiles dans un support	
	▪ Communiquer par un dessin, un schéma, un tableau, un graphe… ➢ Schéma	

Travail à effectuer

- *En procédant à la synthèse des informations vues sur les **muscles** jusqu'ici, **proposez** un **schéma-bilan synoptique à la fois complet et simple** présentant leur **organisation à toutes les échelles**. Ce schéma sera utilement annexé à vos **fiches de révision**. La figure 26 peut aider.*

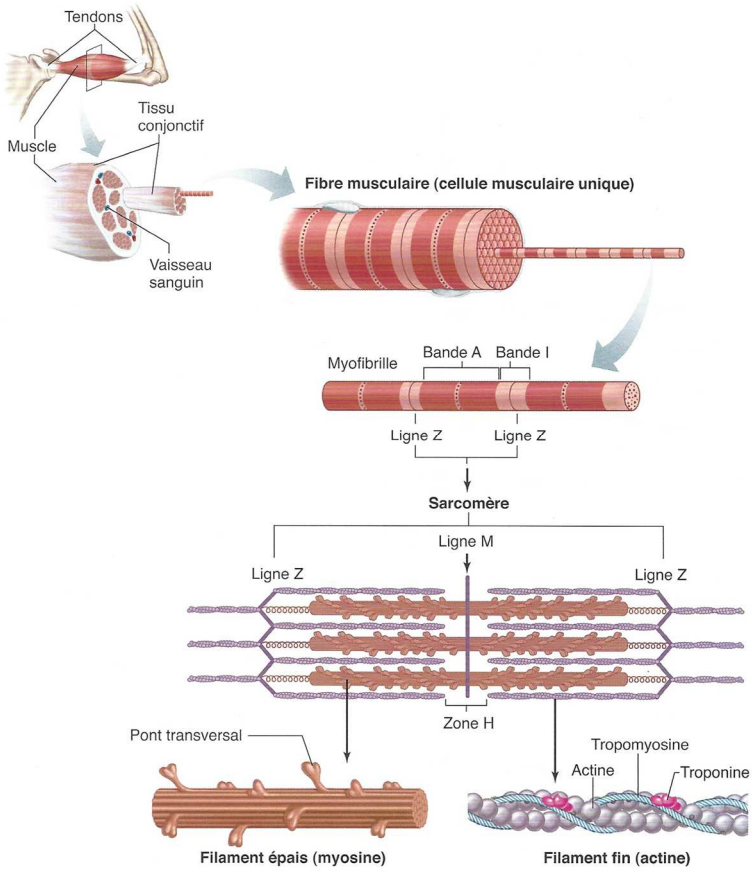


FIGURE 26. L'organisation des unités contractiles d'un muscle de l'échelle de l'organe à l'échelle moléculaire : une vision d'ensemble. D'après VANDER *et al.* (2013).

FIGURE 25. Figure de synthèse sur l'organisation fonctionnelle des cellules musculaires.
Original. À refaire par les étudiants.

3. Un raccourcissement global de l'organe permis par le glissement des myofilaments de myosine sur les myofilaments d'actine au sein des sarcomères : la contraction

a. Une différence observable en microscopie électronique entre l'état contracté et l'état relâché des sarcomères

- **Raccourcissement** des **sarcomères**
  ⇒ raccourcissement global du **muscle**
- Dans le détail :

  >

  >

  >

→ **Glissement** des **filaments myosine/actine**

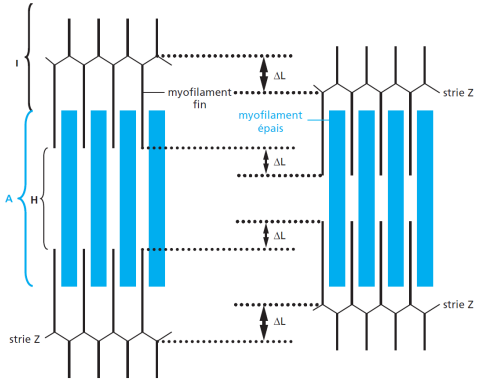


FIGURE 28. Raccourcissement des sarcomères lors de la contraction.
D'après PEYCRU *et al.* (2010b).

b. Un glissement des filaments fins d'actine sur les filaments épais de myosine : la « contraction cytosquelettique »

« Contraction cytosquelettique » :

c. Un processus séquentiel dépendant d'ions calcium et d'ATP

α. Le calcium, ion se liant à la troponine et déclenchant la mise à nu par la tropomyosine des sites de fixation actine-myosine

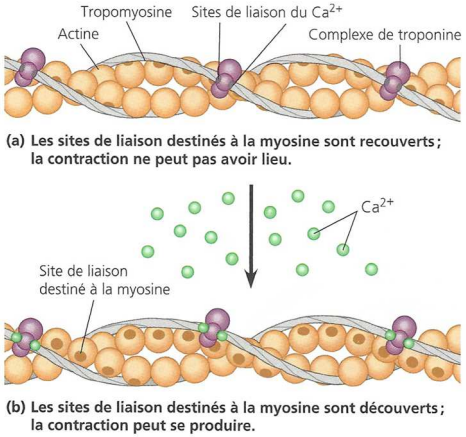


FIGURE 30. Contrôle calcique de la contraction musculaire : mécanisme moléculaire.
D'après CAMPBELL & REECE (2004).

β. L'ATP, molécule centrale du cycle d'interaction actine-myosine (couplage chimio-mécanique)

Cycle d'interaction actine-myosine :

FIGURE 31. Cycle d'interaction actine-myosine au niveau d'une tête de myosine.
Pour plus de clarté, la troponine et la tropomyosine ne sont pas représentées.
D'après CAMPBELL & REECE (2004).

4. Une contraction des fibres musculaires qui répond à un message nerveux : le couplage excitation-contraction

- *Les mécanismes précis du couplage excitation-contraction me semblent hors programme.*

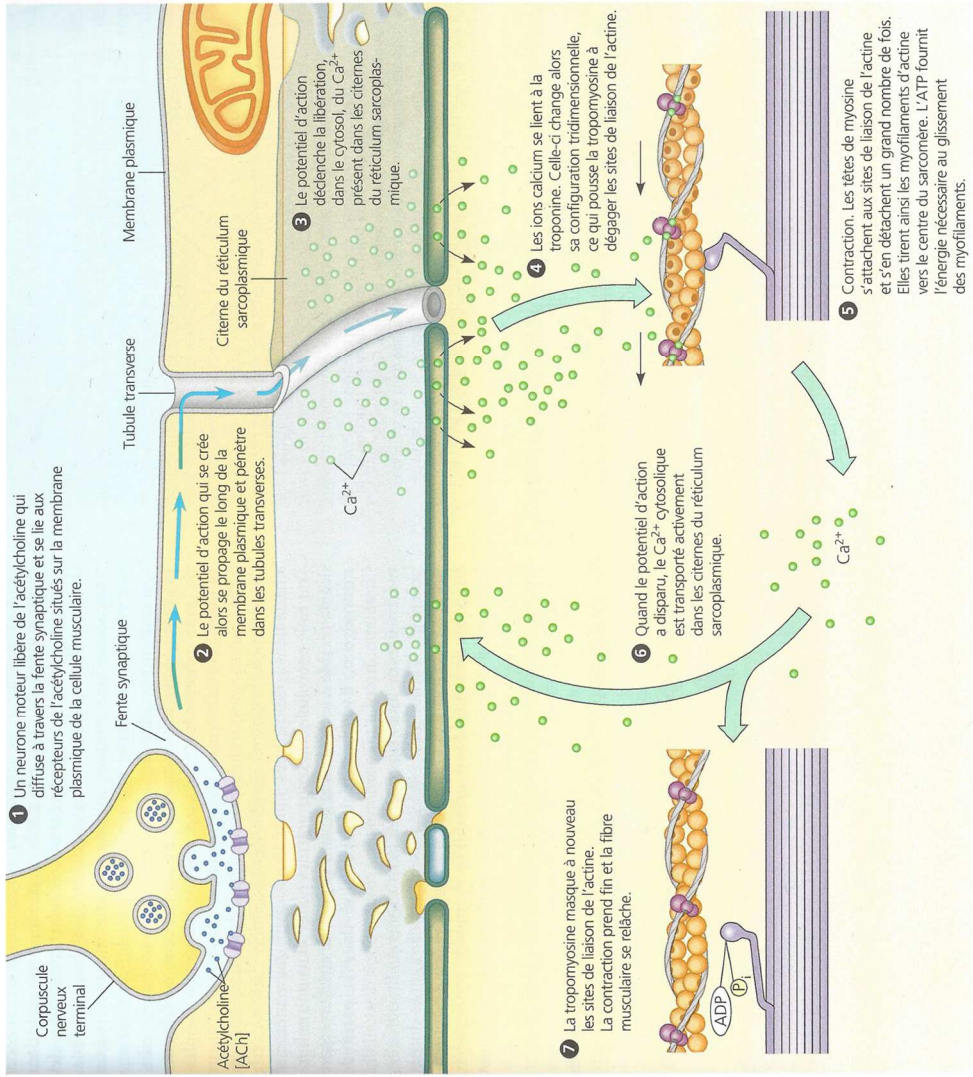


FIGURE 31. Couplage excitation-contraction.
Pour plus de clarté, la troponine et la tropomyosine ne sont pas représentées.
D'après CAMPBELL & REECE (2004).

5. Une contraction qui consomme de l'ATP : le catabolisme de la cellule musculaire striée squelettique

Capacité exigible	✓ À partir de l'exemple de la cellule musculaire striée squelettique, **montrer** le lien entre l'activité de la cellule et les voies cataboliques utilisées (restreintes à l'utilisation d'un stock énergétique, la glycolyse, la respiration mitochondriale et une fermentation). ✓ **Établir** le lien entre la voie métabolique et l'utilisation de dioxygène.

a. La multiplicité des voies métaboliques dans la cellule musculaire : voies anaérobies alactiques (dont créatine phosphate), voies anaérobie lactique (fermentation) et voie aérobie (respiration cellulaire)

Voies de régénération de l'ATP (avec équations) :

-

>

>

-

-

FIGURE 32. Voies de production d'ATP dans les cellules musculaires.
D'après BERNARD (2002). *À produire par l'étudiant.*

Encadré Kbis Glycogène, glycogénolyse et glycogène phosphorylase

Rappels + pour information ? – d'après RICHARD *et al. (2015)*

➲ *Quelques rappels sur le glycogène (à connaître !)*

Glycogène =

Au centre des rosettes, on trouve une **protéine** nommée **glycogénine** qui ***initie la synthèse de glycogène (glycogénogenèse)***.

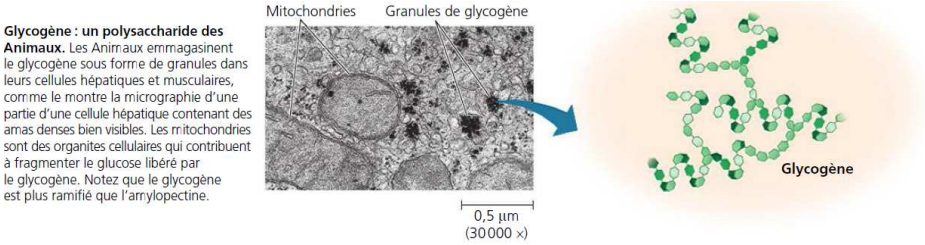
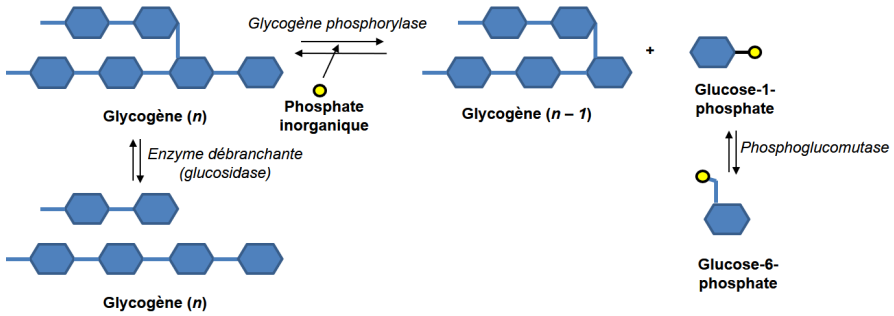


FIGURE a. Le glycogène. D'après CAMPBELL & REECE (2004)
La représentation moléculaire doit être maîtrisée (revoir Biotechnologies ou Complément 2)

➲ *La glycogénolyse*

*Dans les muscles, **G-6-P** et **G-1-P** sont directement **incorporés à la glycolyse**.*

A/ DANS LES CELLULES MUSCULAIRES ET HÉPATIQUES



B/ EN PLUS : SEULEMENT DANS LES CELLULES HÉPATIQUES

FIGURE b. La glycogénolyse. *Schéma original.*

Glycogénolyse (surtout pas « ~~glycolyse~~ » !) =

➢ Notons que, parmi les **organes** avec du **glycogène**, **seul le foie présente la glucose-6-phosphatase et la glucose-1-phosphatase**, ce qui explique que **seul le foie puisse libérer du glucose dans le sang à partir de glycogène**.

➲ *Une enzyme allostérique dimérique permettant la phosphorolyse d'amidon en glucose-1-phosphate dans le cadre de la glycogénolyse*

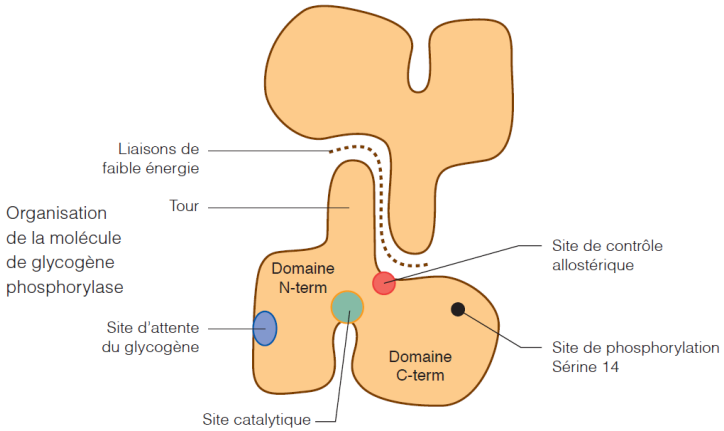
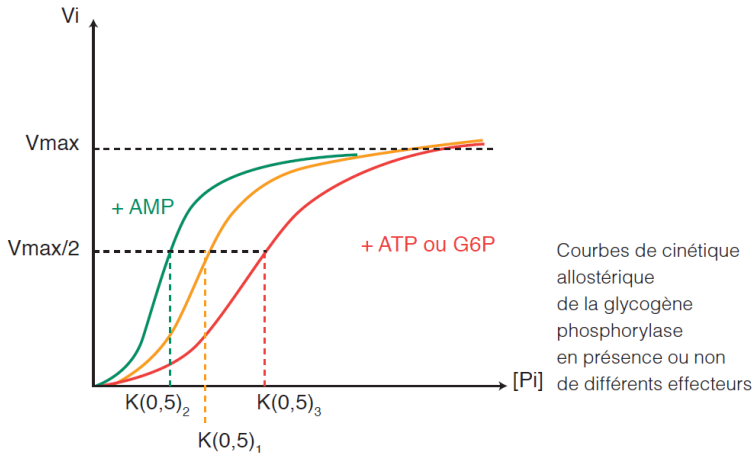


FIGURE c. Organisation de la glycogène phosphorylase [*pour information*].
D'après SEGARRA *et al.* (2014).

FIGURE d. Mode d'action de la glycogène phosphorylase. D'après SEGARRA *et al.* (2014).
La réaction se répète de nombreuses fois, dépolymérisant progressivement l'amidon.

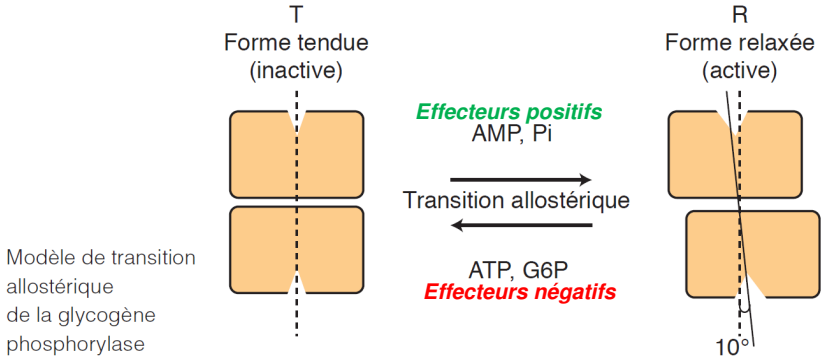
➲ *Une enzyme dont l'activité est modulable par des effecteurs allostériques*



Courbes de cinétique allostérique de la glycogène phosphorylase en présence ou non de différents effecteurs

$K_{(0,5)}$: constante de demi-saturation définie pour les enzymes allostériques, elle correspond à l'équivalent du K_M des enzymes michaeliennes. Vi : vitesse initiale ; [Pi] :concentration en phosphate inorganique

FIGURE e. <u>Cinétique la glycogène phosphorylase avec ou sans effecteurs allostériques</u>. D'après SEGARRA *et al.* (2014).



Modèle de transition allostérique de la glycogène phosphorylase

FIGURE f. <u>Impact des effecteurs allostériques sur la glycogène phosphorylase</u>. D'après SEGARRA *et al.* (2014).

Intérêts :
- ***AMP, Pi*** *: leur* ***accumulation*** *peut indiquer une* ***grande consommation d'ATP*** *et donc le besoin de* ***produire plus d'ATP*** *en* ***augmentant la concentration intracellulaire en glucose phosphorylé*** *disponible.*
- ***ATP*** *: au contraire, une* ***accumulation d'ATP*** *dans la cellule indique une* ***diminution du besoin d'ATP****, donc une* ***diminution du besoin de glycolyse*** *et donc* ***de glucose phosphorylé****.*
- ***G-6-P*** *: son* ***accumulation*** *indique une* ***baisse de la glycolyse****. Le* ***besoin en G-1-P*** *est donc lui-même* ***amoindri****.*

➲ *Une enzyme dont l'activité est en outre modulable par son état de phosphorylation-déphosphorylation*

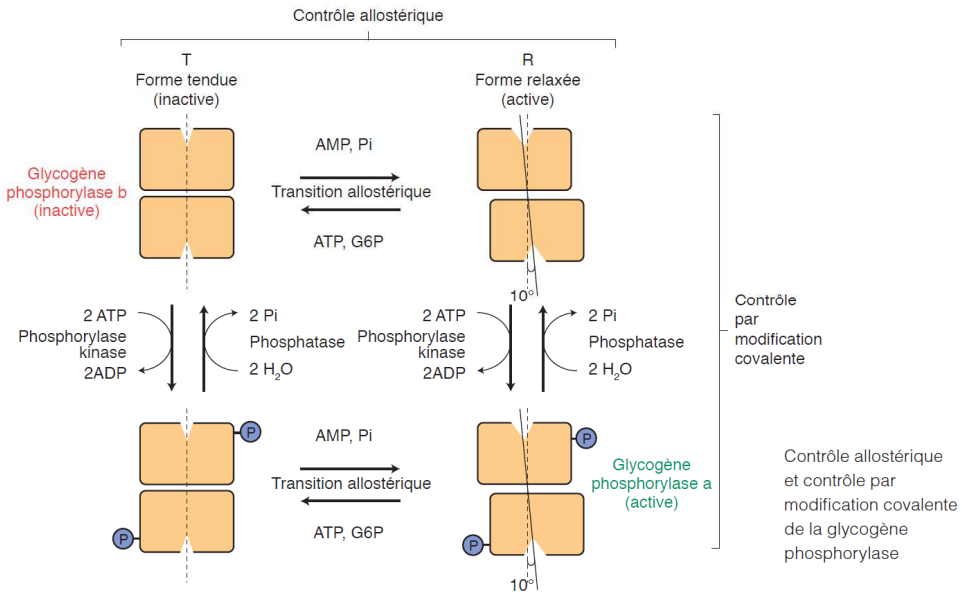


FIGURE g. <u>Le double contrôle – allostérique + par phosphorylation-déphosphorylation – de l'activité de la glycogène phosphorylase</u>. D'après SEGARRA *et al.* (2014).

➢ La **glycogène phosphorylase** est enfin **modifiable** par **phosphorylation-déphosphorylation** ; la **forme a phosphorylée** est **active** alors que la **forme b déphosphorylée** est **inactive** (ou du moins, **beaucoup moins active**) (figure g).

➢ La **phosphorylase kinase** responsable de la **phosphorylation de la glycogène phosphorylase** est elle-même activée par **phosphorylation** lors de la **transduction du signal glucagonique**.
➢ La **phosphatase responsable** de la **déphosphorylation de la glycogène phosphorylase** est elle-même activée par **phosphorylation** lors de la **transduction du signal insulinique**.

➢ Il existe donc une **superposition** :
- D'un **contrôle** par **modification allostérique** (figure g) ;
- D'un **contrôle** par **modification covalente** (figure g) ;
- D'un **contrôle hormonal** contrôlant le précédent.

➢ Cela illustre la **complexité** et les **multiples niveaux** auxquels intervient le **contrôle de l'activité métabolique**.

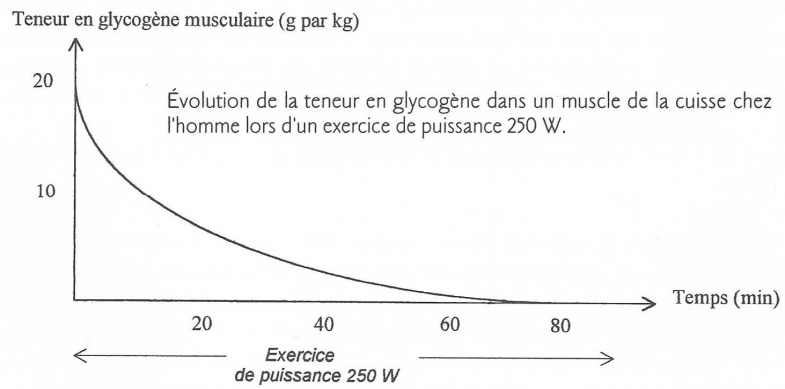


FIGURE 33. Utilisation et épuisement progressif du glycogène lors d'un effort physique. D'après BERNARD (2002).

b. Une intervention séquentielle de ces voies métaboliques lors d'un effort prolongé en lien avec les conditions d'approvisionnement en O_2 des tissus

FIGURE 33. Intervention séquentielle des différentes voies de production d'ATP en fonction de la durée d'un exercice physique prolongé. D'après BERNARD (2002).

c. Une prépondérance des voies qui définit plusieurs types cellulaires de fibres musculaires

TABLEAU IV. Typologie des fibres musculaires striées squelettiques. S. MOREL (2002), Univ. Rennes 2, https://cursus.univ-rennes2.fr/file.php/848/TypologieMusculaire.pdf (consultation mars 2016)

Structure	Type I (Fibres lentes) (oxydatives)	Type II (Fibres rapides – sens large)	
		Type IIa (intermédiaires) (oxydatives)	Type IIb (rapides – s. strict) (glycolytiques)
Taille / Diamètre			
Abondance des mitochondries			
Activité ATPasique de la myosine			
Enzymes mitochondriales			
Enzymes glycolytiques			
Abondance du réticulum sarcoplasmique			
Abondance du glycogène			
Abondance des réserves lipidiques			
Abondance de la myoglobine	*[Fibres « rouges »]*		*[Fibres « blanches »]*
Vascularisation			

- Type I → plutôt **mouvements fréquents** et **prolongés**
- Type IIa
- Type IIb → plutôt **mouvements brefs** et **intenses**

La **proportion** de ces différents **types de fibres** varie en fonction du **muscle considéré** mais aussi de l'**activité physique** : *l'entraînement modifie ainsi de manière très importante la masse musculaire et sa typologie.*

Bilan (adapté du programme)	✓ La **cellule musculaire striée squelettique** consomme une **grande quantité d'ATP**. ✓ La **régénération de l'ATP** met en jeu **différentes voies possibles** (voies anaérobies alactiques, voie anaérobie lactique, voie aérobie) en lien avec le **type cellulaire** et les **conditions d'approvisionnement en dioxygène** du tissu (voir chapitre 10).

d. Un retour aux conditions initiales après un exercice musculaire notamment caractérisé par le remboursement d'une dette en dioxygène

Capacité exigible	✓ **Décrire** le retour aux conditions initiales après un exercice musculaire.

α. L'arrêt de la contraction : mécanismes de la relaxation

Fin du **couplage excitation-contraction** :
-

-

-

⇒ ***Sarcomères*** *= retrouvent leur* ***taille au repos***
NB Phénomène souvent ***accentué*** *par fonctionnement des* ***muscles antagonistes***

β. L'existence d'une dette en dioxygène dont le remboursement assure la reconstitution du stock de créatine phosphate et l'élimination du lactate sanguin

Dette en dioxygène :
Récupération :

Remboursement :
- de la **dette alactique** :

- de la **dette lactique** :

NB Stock de ***glycogène*** *reconstitué en* ***période post-prandiale***

⮝ **FIGURE 34. La dette en O_2 et son remboursement.** D'après BERNARD (2002).

Bilan (adapté du programme)	✓ En **fin d'exercice**, la cellule revient à son **état initial** (**dette en dioxygène**).

B. Le catabolisme oxydatif : une vue d'ensemble

Ces aspects sont largement traités en **Biotechnologies** : je renvoie à vos cours sur le sujet.

1. La notion de respiration cellulaire : une oxydation complète de la matière organique

Respiration cellulaire :

Contours définitionnels variables !
- s. strict : = ***mécanismes mitochondriaux***
- s. large 1 : = ***catabolisme oxydatif aérobie (tous composés)***
- s. large 2 : = ***catabolisme oxydatif du glucose***

2. L'exemple du catabolisme du glucose : une vision globale

a. Équation-bilan de la respiration cellulaire (sens large)

→ *Suppose* ***EGR*** *(échanges gazeux respiratoires) :*

Respiration (échelle de l'organisme) :
*Ne pas confondre « **respiration** » tout court et « **respiration cellulaire** »*

b. Trois étapes principales

α. La glycolyse cytosolique

Glycolyse (voie d'EMBDEN-MEYERHOFF) :

Équation :

- **Hyaloplasmique**
- Pas d'intervention de ~~gaz respiratoires~~
- **Production** de (pour 1 molécule de glucose) :
  > **2 ATP** (4 ATP en réalité, mais 2 consommés) [*phosphorylation au niveau du substrat*]
  > pouvoir réducteur : **2 NADH, H^+**
- Que des **couplages chimio-chimiques**

β. Le cycle de KREBS au niveau de la matrice mitochondriale

Cycle de KREBS (= cycle des acides tricarboxyliques = cycle de l'acide citrique) :

Équation :

- **Mitochondrial (matrice)**
- Production de **CO_2 [oxydation de matière organique par décarboxylation]**
- **Production** de (pour 1 molécule de glucose initiale) :
  > **2 ATP** [*phosphorylation au niveau du substrat*]
  > pouvoir réducteur : **8 NADH, H^+ + 2 $FADH_2$**
- Que des **couplages chimio-chimiques**

γ. La chaîne respiratoire et la phosphorylation oxydative au niveau de l'espace intermembranaire

Chaîne respiratoire :

-

-

-

ATP synthase (membrane interne) → production d'environ **34 ATP** (pour 1 molécule initiale de glucose)

Phosphorylation oxydative
[**couplage** globalement **chimio-chimique**]

FIGURE 35. Vue d'ensemble de la respiration cellulaire au sens large. D'après MARIEB (2005)

*On notera la production d'**ATP** à toutes les étapes.*
*On notera la production de **pouvoir réducteur (NADH,H^+ + $FADH_2$)** lors de la **glycolyse** et du **cycle de KREBS** puis sa consommation par **oxydation** lors de la **phosphorylation oxydative**.*

c. L'existence d'oxydations incomplètes et anaérobies de matière organique : les fermentations

Fermentation :

Bilan : **2 ATP produites**
Anaérobie.

d. Les voies anaérobies alactiques, un cas particulier des cellules musculaires

- *Voir plus haut : nous n'irons plus loin sur ces aspects.*

3. L'existence d'autres voies d'entrée dans le catabolisme oxydatif

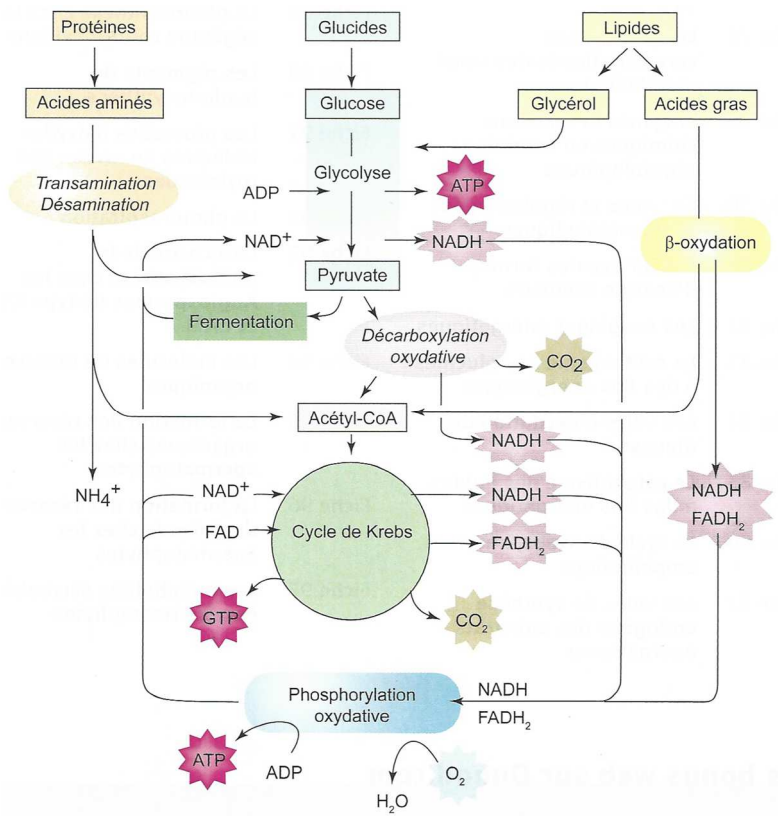


FIGURE 37. **Panorama du catabolisme des cellules eucaryotes [pour information]**.
D'après RICHARD *et al.* (2015)

C. La glycolyse, une oxydation partielle du glucose en pyruvate

1. Une dizaine de réactions que l'on peut diviser en deux phases clefs : investissement puis remboursement d'énergie

Deux parties (décrire les points essentiels) :

- **Phase d'investissement de l'énergie** :

Remarques :
- Enzyme 1 :

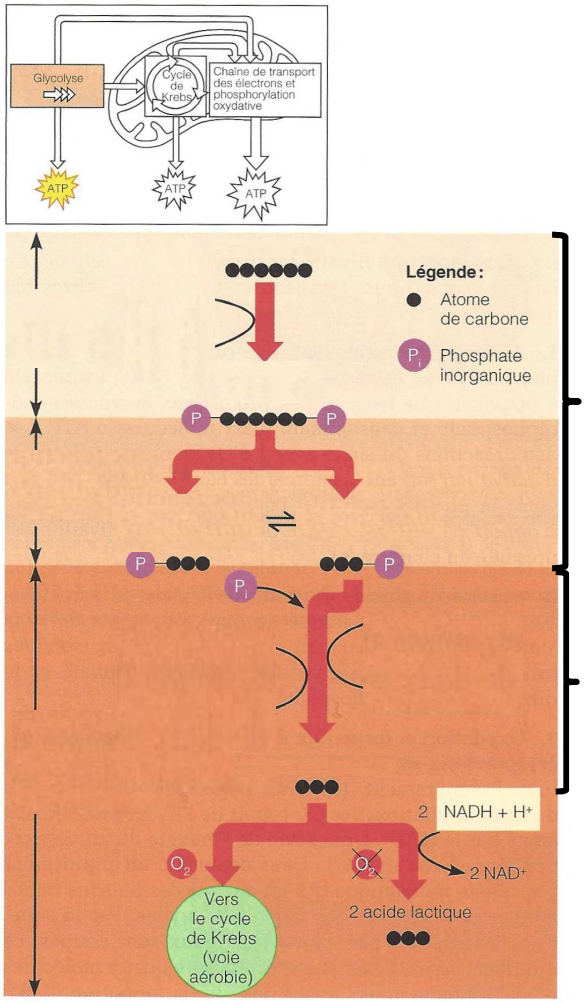
- Enzyme 3 :

- Production de **2 trioses phosphates** (PGAL) à l'arrivée [*plus **faciles à oxyder** que les **hexoses** où le **groupement carbonyle** est souvent **masqué par la cyclisation***]

- **Phase de remboursement (= récupération) de l'énergie)** :

Remarques :
- Production de **4 ATP** mais, comme la phase 1 a consommé 2 ATP, **seuls 2 ATP** sont produites en **net**
- Production de **pouvoir réducteur** (**2 NADH, H^+**)
- Production de **2 pyruvates**

FIGURE 38. **Une vision de la glycolyse**. D'après RICHARD *et al.* (2015)
*Les **réactions (1), (3) et (10)** sont **irréversibles**.*

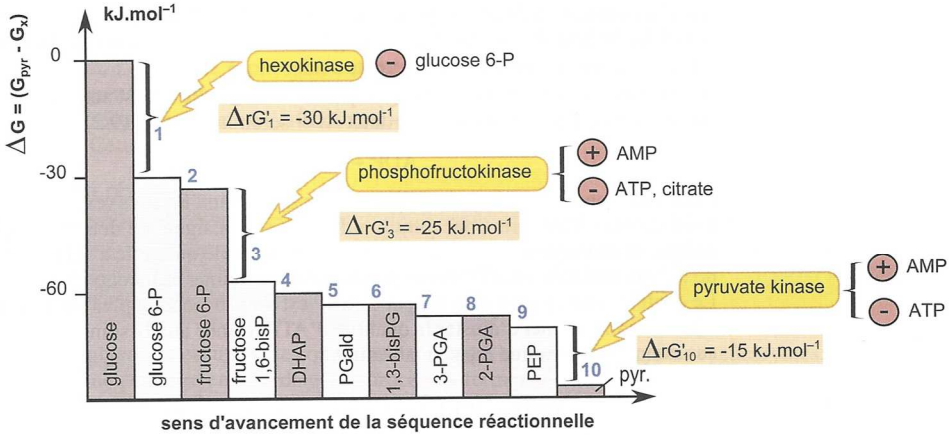


Les trois principales phases de la glycolyse.
Au cours de la phase 1, le glucose est activé par phosphorylation et converti en fructose-1,6-diphosphate. À la phase 2, le fructose-1,6-diphosphate est scindé en deux fragments de trois atomes de carbone (isomères interconvertibles). Au cours de la phase 3, les fragments à trois atomes de carbone sont oxydés (par retrait d'hydrogène) et quatre molécules d'ATP sont ainsi formées. La destinée de l'acide pyruvique dépend de la présence ou de l'absence d'O_2 moléculaire.

FIGURE 39. Une autre vision de la glycolyse. D'après MARIEB (2005)
On notera que certains auteurs divisent la glycolyse en 3 phases plutôt que 2 (la scission de F-1,6-BisP constitue pour eux une phase supplémentaire)

FIGURE 40. Rendement énergétique de la glycolyse. D'après CAMPBELL & REECE (2004).
À produire par l'étudiant.

2. Le contrôle de la glycolyse



Profil énergétique de la glycolyse et les trois niveaux de contrôle.
1 à 10 : numéros des réactions ; réaction 1 : glucose converti en glucose 6-P.

FIGURE 41. Diagramme énergétique de la glycolyse. D'après PEYCRU *et al.* (2013)
*Les **réactions (1), (3) et (10)** sont **irréversibles** et fortement **exergoniques**.*

= **3 points de contrôle** :

-

-

-

FIGURE 42. Le contrôle de la glycolyse [cas des Mammifères].
D'après SEGARRA *et al.* (2014)
*Les **réactions (1), (3) et (10)** sont **les points clefs**.*

D. Le devenir du pyruvate

1. En conditions aérobies : entrée dans la mitochondrie et conversion en acétyl-CoA avec production de pouvoir réducteur (NADH,H⁺)

FIGURE 43. Entrée du pyruvate dans la mitochondrie et conversion en acétyl-coenzyme A dans la matrice. D'après CAMPBELL & REECE (2004)

- Passage de la **membrane externe** par des **porines**.

Porines :

- Passage de la membrane interne par **perméase** (passif) ou **symport avec H^+** (voire K^+ ?) (actif)
- Pour **deux pyruvates**, **production de 2 acétyl-CoA** et **2 NADH,H^+**
[Et 2 CO_2, en lien avec la décarboxylation du pyruvate]

2. En conditions anaérobies chez certaines cellules : la fermentation qui ré-oxyde les coenzymes préalablement réduits par la glycolyse

Fermentation :

a. Deux types de fermentations en fonction du produit formé : la fermentation alcoolique et la fermentation lactique

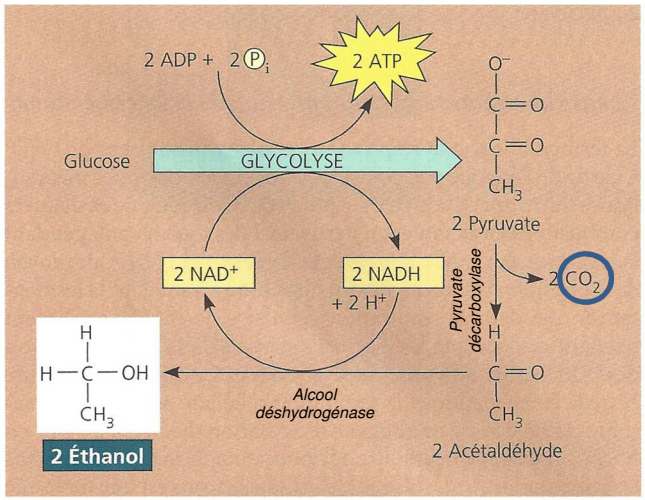
Fermentation alcoolique :
Fermentation lactique :

b. Intérêts biologiques de la fermentation

La fermentation présente de **nombreux intérêts et applications industriels** : voir Biotechnologies.

- Faible production d'ATP par rapport à la respiration cellulaire complète
- Intérêts néanmoins :
  >
  >
  >

Chez les **Mammifères**, le **lactate** est un **déchet** qui **s'accumule** dans le **sang** mais il est **détoxifié** et **reconverti** en **glucose** dans le **foie** (figure 44bis).



(a) Fermentation alcoolique

(b) Fermentation lactique

Fermentation. En l'absence de dioxygène, plusieurs types de cellules font appel à la fermentation pour produire de l'ATP par phosphorylation au niveau du substrat. Le pyruvate, le produit final de la glycolyse, sert d'accepteur d'électrons pour l'oxydation du NADH + H^+ en NAD^+. Le NAD^+ peut ensuite servir de nouveau pendant la glycolyse. Deux des produits principaux de la fermentation sont **(a)** l'éthanol et **(b)** le lactate, la forme ionisée de l'acide lactique.

FIGURE 44. Deux types de fermentations. D'après CAMPBELL & REECE (2004)

Chez les micro-organismes : voir Biotechnologies.

E. Dans les mitochondries : une oxydation complète des substrats organiques (respiration cellulaire au sens strict)

1. Rappels sur la structure des mitochondries

FIGURE 45. Rappel de l'organisation des mitochondries. D'après ALBERTS *et al.* (2004)

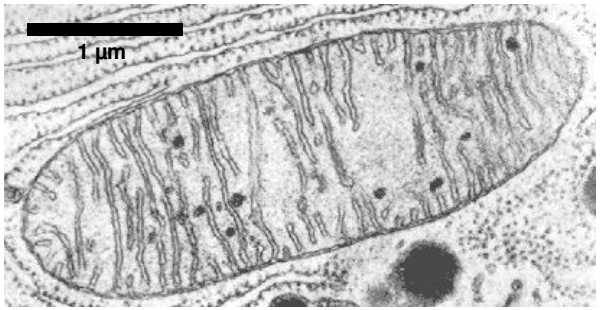


FIGURE 46. Rappel de l'ultrastructure (MET) des mitochondries.
https://sites.google.com/site/testtpeilm/home/de-l-aliment-a-d-atp (consultation mars 2016)

2. Le cycle de Krebs : un ensemble de réactions matricielles cycliques produisant une importante quantité de pouvoir réducteur

Intérêts :
-

-

-

S'ajoutant aux **deux molécules de CO_2** produites lors de la **conversion du pyruvate en acétyl-CoA**, on arrive donc à **6 molécules de CO_2 au total produites par la respiration**.

⮝ **FIGURE 47. Cycle de KREBS simplifié.** D'après CAMPBELL & REECE (2004)
*Pensez à **doubler les quantités** pour obtenir la **stœchiométrie** valable pour une **molécule de glucose** !*

*La **matière organique** est ici finalement **complètement oxydée** : du glucose initial, il ne reste **que du CO_2**…*

3. La conversion du pouvoir réducteur en une importante quantité d'ATP : chaîne respiratoire et phosphorylation oxydative

Phosphorylation oxydative :

a. L'établissement d'un gradient de protons dans l'espace intermembranaire : un couplage chimio-osmotique entre oxydation des coenzymes et flux de protons

α. Principe général

- **Oxydation** des **coenzymes réduits**
  ⇒ **libération d'électrons** (et de protons)
  ⇒ **apport d'énergie**
- ⇒ Mise en place d'un **gradient de protons** au niveau de **l'espace intermembranaire** [couplage chimio-osmotique]
- **Dioxygène = accepteur final d'électrons → réduit en eau**

β. Composition et fonctionnement de la chaîne respiratoire

À résumer

⮝ **FIGURES 48-49. La chaîne respiratoire.**

γ. Un transfert des électrons selon un gradient de potentiels redox croissants

⮝ **FIGURE 51. Diagramme énergétique simplifié de la chaîne respiratoire figurant les potentiels redox standards.** D'après SEGARRA *et al.* (2014)

b. L'emploi du gradient de protons dans la phosphorylation d'ADP en ATP par l'ATP synthétase : un couplage osmochimique

La **membrane interne**, très **riche en ATP synthase**, comprend des **replis** (**crêtes mitochondriales**) qui **augmentent la surface** au niveau de laquelle l'ATP peut être synthétisée.

F. Bilan énergétique comparé de la respiration cellulaire au sens large et de la fermentation dans le cas d'une molécule de glucose

Capacité exigible	✓ **Établir** la relation entre une voie métabolique et ses caractéristiques (sa localisation, son rendement, sa vitesse).

1. Cas de la respiration cellulaire (sens large)

- **36 à 38 ATP**
- récupération d'environ **40 % de l'énergie chimique** du **glucose**

Explication :
- Dans une **molécule de glucose**, la **somme des énergies de liaisons des atomes** est de **2860 kJ • mol^{-1}** (conditions standard)
- L'**énergie de liaison** entre le **3e phosphate** et **l'ADP** dans **l'ATP** vaut **30,5 kJ • mol^{-1}** (conditions standards).
- La **respiration au sens large** produit **36 à 38 ATP**.
- Le **rendement énergétique maximal** est donc de 38 × 30,5/2860 = **41 %**.

⮝ **FIGURE 53. Rendement énergétique de l'oxydation complète d'une molécule de glucose.**
D'après CAMPBELL & REECE (2004)
À produire par l'étudiant.

⮟ **TABLEAU V. Bilan énergétique de l'oxydation complète d'une molécule de glucose.**
D'après SEGARRA *et al.* (2014)

Voie	ATP formés	Pouvoir réducteur formé	ATP produit après oxydation du pouvoir réducteur par la chaîne respiratoire
Glycolyse (net)			
Décarboxylation oxydative du pyruvate			
Cycle de KREBS			
Bilan partiel			
Bilan total			

2. Cas des fermentations

- **2 ATP** par la glycolyse = **18 à 19 fois moins que l'oxydation complète** par respiration du glucose [**Rendement énergétique 2 %**]

G. Le cas de l'oxydation catabolique des acides gras (AG) : l'hélice de LYNEN ou bêta-oxydation des acides gras

1. Un processus mitochondrial ou péroxysomique permettant la production de pouvoir réducteur

Bêta-oxydation des AG = hélice de LYNEN :

- **Péroxysomique** chez les **Angiospermes** (exactement **glyoxysomique**)
- Souvent **mitochondriale** chez les **Mammifères** (parfois **péroxysomique**)

2. Un processus qui suppose une oxydation progressive d'un acide gras « activé »

- **Activation de l'AG** en **acyl-coenzyme A** (acyl-CoA) [cytosolique, consommateur d'ATP]
- Dans la **matrice** : **formation d'acétyl-coenzyme A** et de **pouvoir réducteur *($FADH_2$, $NADH,H^+$)*** par **double décarboxylation** (perte de 2 C) de l'acide gras activé [répétition *n* fois]

⮝ **FIGURE 55. Principe général de l'hélice de LYNEN [à retenir ?].** D'après PEYCRU *et al.* (2010b)

3. Un processus qui produit du pouvoir réducteur (NADH, H^+ ; $FADH_2$) ensuite utilisé par la respiration mitochondriale

H. Bilan sur le fonctionnement énergétique de la cellule musculaire striée squelettique

- Voir figure 56.

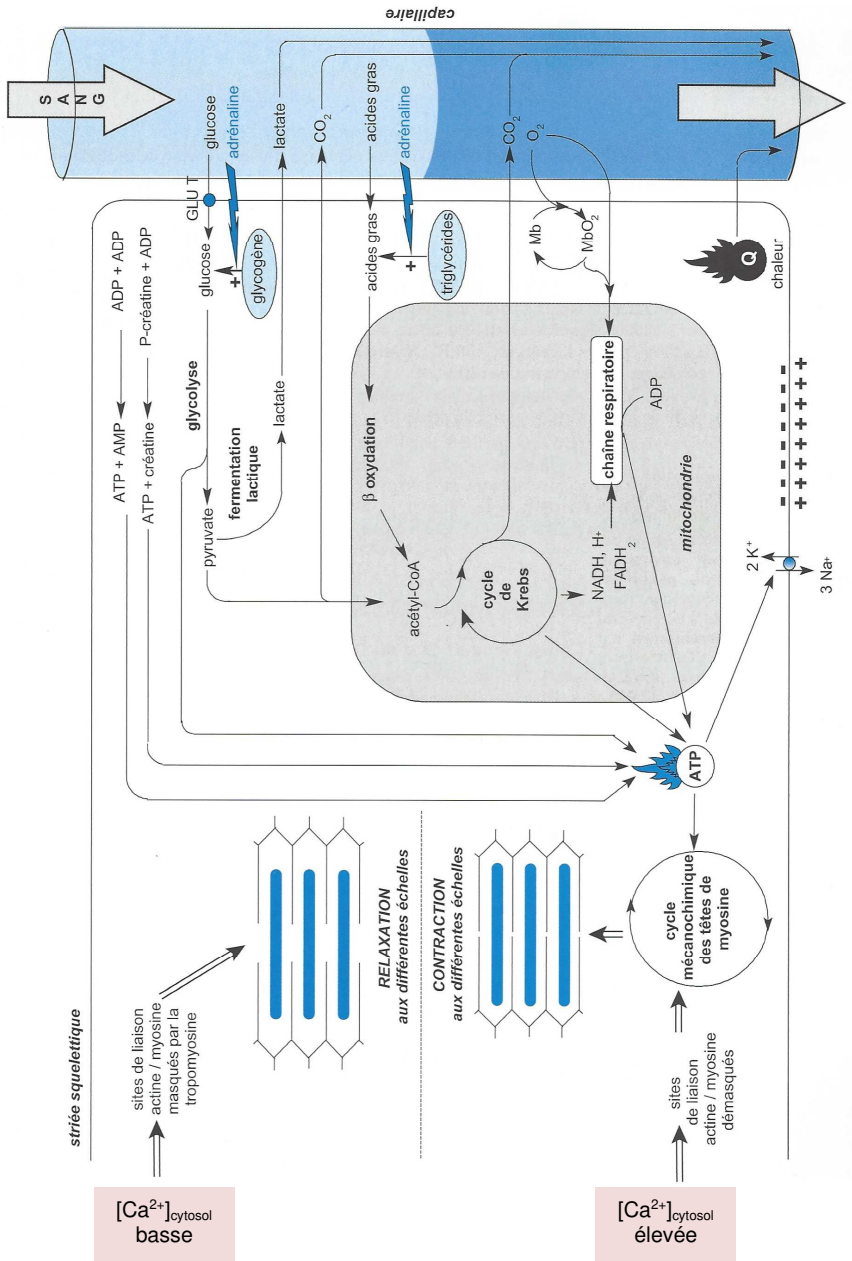
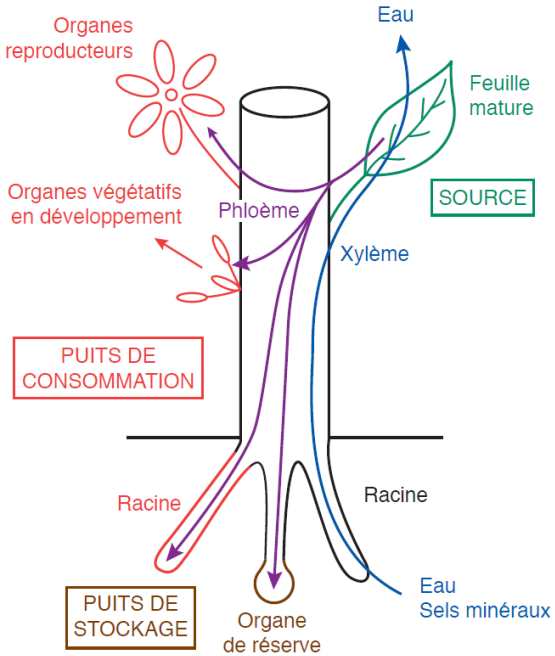


FIGURE 56. Bilan sur la cellule musculaire striée squelettique. D'après PEYCRU *et al.* (2010b).

III. 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 11 (Les Angiospermes, organismes autotrophes à vie fixée)
Voir aussi les conséquences des variations des rythmes saisonniers (chapitre 12)



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

FIGURE 57. Corrélations trophiques entre organes chez Angiospermes (été).
[Rappels] D'après SEGARRA *et al.* (2015).

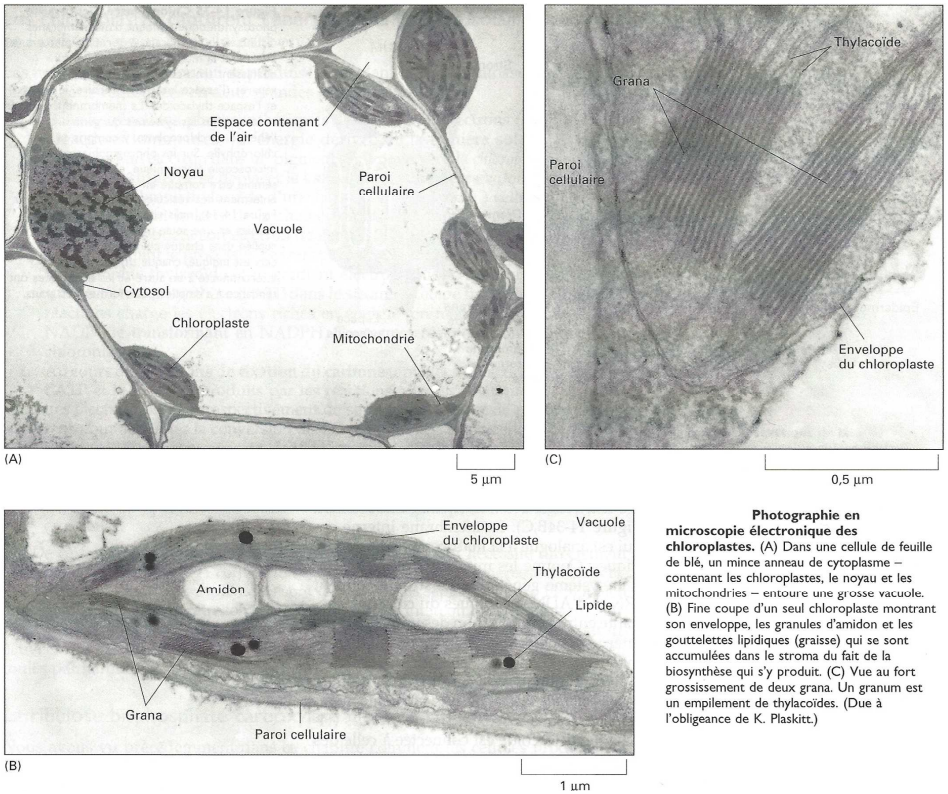
B. La réduction du CO_2 et la synthèse glucidique en présence de lumière : la photosynthèse en C3

Voir TP 1.4. (Étude pratique de la photosynthèse)
Revoir aussi le chapitre 11 (Les Angiospermes, organismes autotrophes à vie fixée)

Capacité exigible	✓ **Étudier** l'autotrophie vis-à-vis du carbone à partir de l'exemple d'une cellule végétale chlorophyllienne.

1. La photosynthèse, une réduction du CO_2 en matière organique au moyen de l'énergie lumineuse qui a lieu dans les chloroplastes

Photosynthèse :
Métabolisme en C3 :



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

FIGURE 58. Organisation d'un chloroplaste : rappels. D'après ALBERTS *et al.* (2004)

Équation-bilan de la photosynthèse :

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

2. 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**

- **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**).*

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

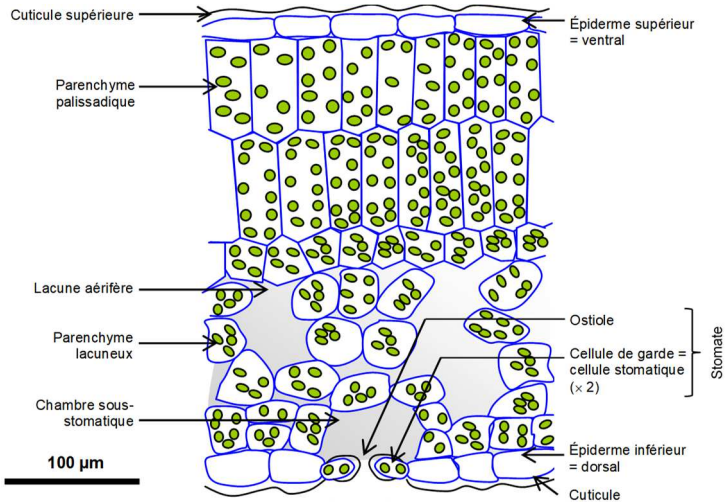


FIGURE 61. Coupe transversale d'une feuille d'Angiospermes Eudicotylédones.
http ://svt.ac-dijon.fr/schemassvt/article.php3?id_article=1356 (consultation décembre 2015).

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) :

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

Spectre d'absorption :
Spectre d'action :

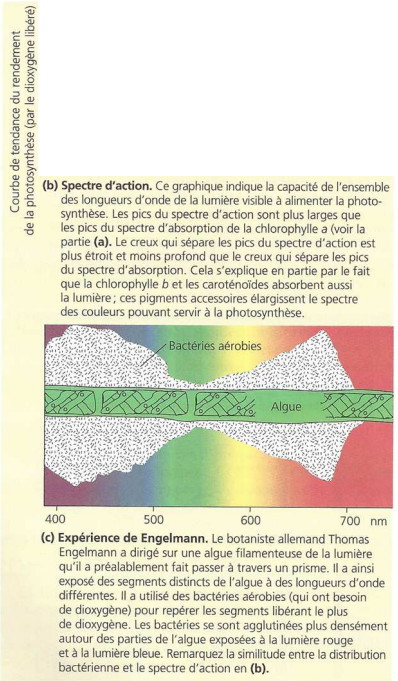


FIGURE 62. Spectre d'action et d'absorption des pigments photosynthétiques.
D'après CAMPBELL & REECE (2004)

Liste des **pigments assimilateurs** :

-

-

*(!) Richesse en **doubles liaisons conjuguées** → électrons **délocalisables** → la **captation des photons** fait **changer les électrons d'orbitales électroniques***
*⇒ La **désexcitation 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***

FIGURE 62. Chlorophylle a (à gauche) et β-carotène (à droite).
Notez l'important réseau de liaisons conjuguées.
D'après SEGARRA *et al.* (2014). Sachez faire des **schémas simplifiés** !

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

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

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

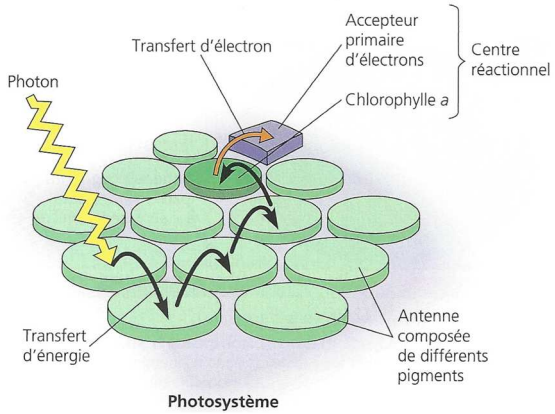


FIGURE 63. Transmission d'énergie dans un photosystème jusqu'à un centre réactionnel.
D'après CAMPBELL & REECE (2004)

PSI (photosystème I) :

PSII (photosystème II) :

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 **ferrédoxine** (une protéine à fer et soufre).

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

Chaîne photosynthétique :

*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**]*

À résumer à votre convenance :

⮝ **FIGURES 64-65. Diagrammes énergétiques simplifiés de la chaîne photosynthétique.**

ii. Résultat du fonctionnement de la chaîne photosynthétique : production de pouvoir réducteur et d'un gradient de protons ($NADPH,H^+$)

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

⮝ **FIGURES 66-67. Chaîne photosynthétique.**

c. Bilan de la phase photochimique

Couplage globalement photochimique :

-

-

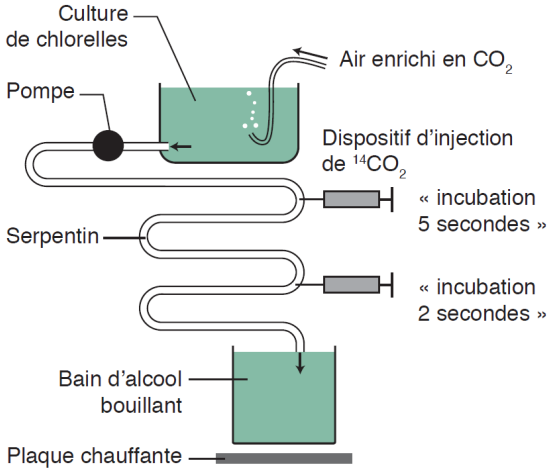
-

-

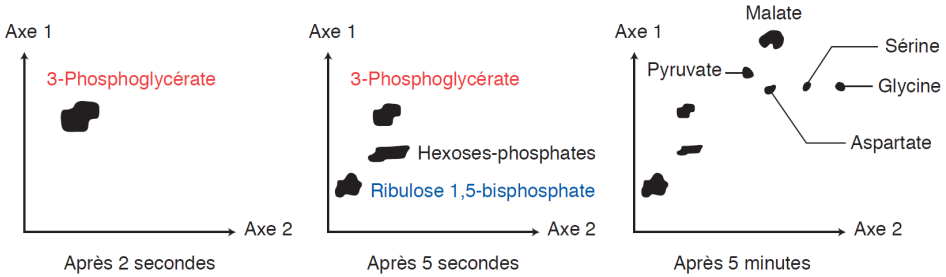
Bilan : production de **composés utilisés par la phase chimique** (**pouvoir réducteur**, **ATP**)

3. 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)

a. Les expériences de CALVIN et la mise en évidence des réactions de la phase chimique

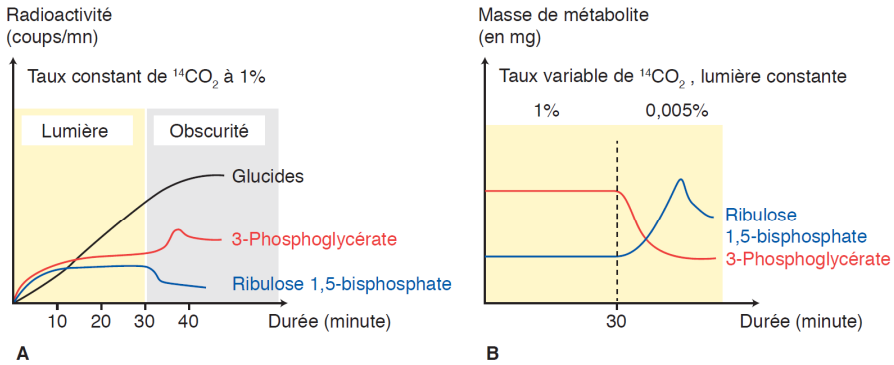


Dispositif expérimental de Calvin



Chromatogrammes obtenus pour différentes durées d'exposition au $^{14}CO_2$.

Résultats obtenus



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

FIGURE 69. 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** [**ribulose-1,5-bisphosphate carboxylase-oxydase**] 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 **génome plastidial** alors qu'une autre partie est codée par le **génome nucléaire**.

Équation du cycle de CALVIN :

⮝ **FIGURE 71. <u>Cycle de CALVIN-BENSON : deuxième vision</u>.** D'après CAMPBELL & REECE (2004)

À refaire par l'étudiant.

Principales étapes :

-

-

-

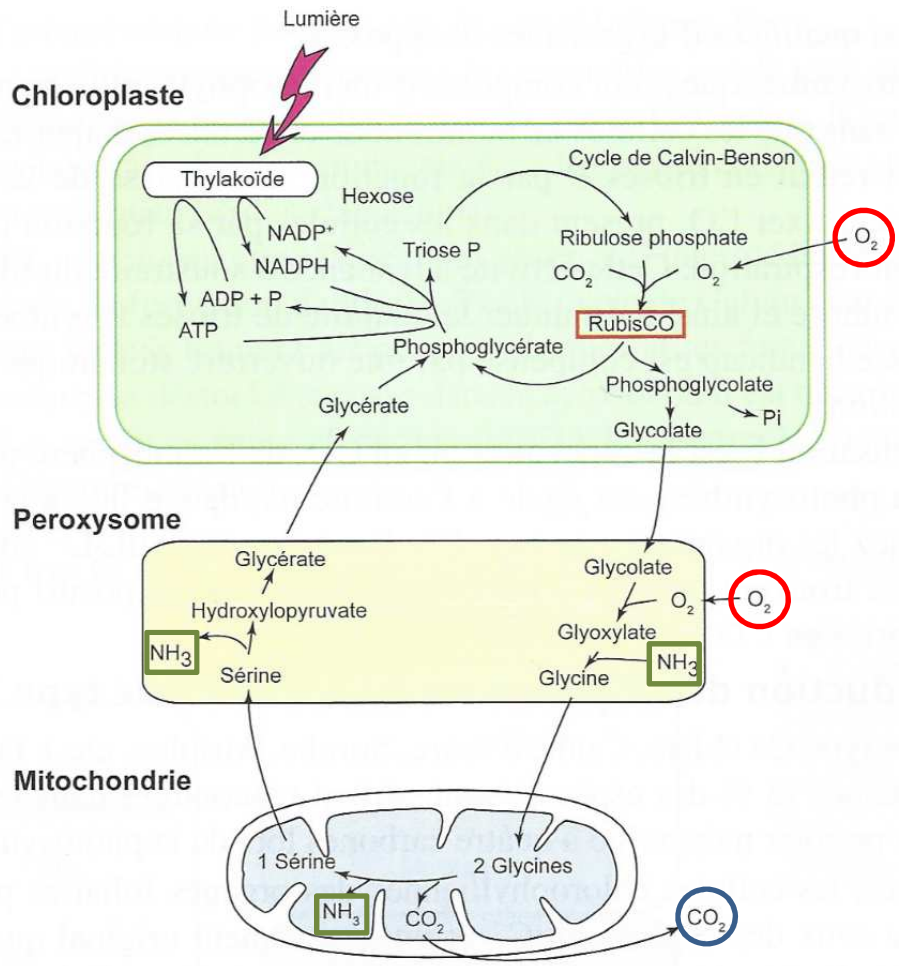
-

c. La dualité carboxylase-oxydase de la RuBisCO et la photorespiration [*hors programme ?*]

Photorespiration :

Encadré N La photorespiration : quelques éléments

Hors programme – pour information



⮝ **FIGURE b. <u>La photorespiration ou voie du glycolate</u>.** D'après RICHARD *et al.* (2015)

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

- Voir figure 72.

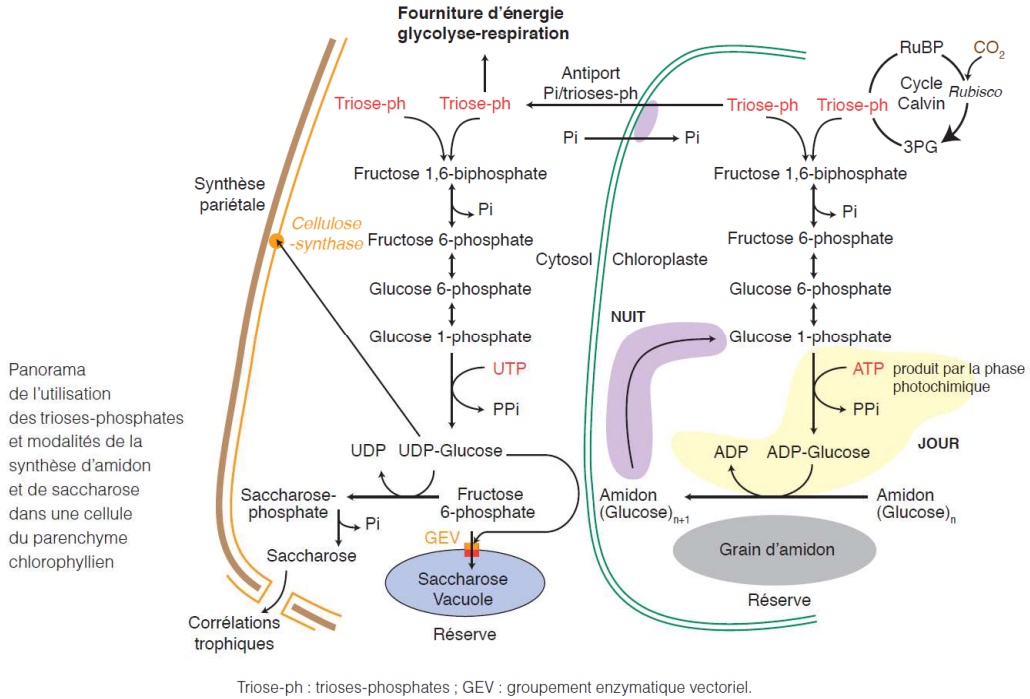
⮝ **FIGURE 72. Résumé de la photosynthèse en C3.** D'après CAMPBELL & REECE (2004)

C. Le devenir des trioses phosphates et les conséquences de l'alternance jour-nuit dans les cellules chlorophylliennes

Capacité exigible	✓ **Construire** un schéma-bilan du métabolisme de la cellule selon les conditions d'éclairement (jour / nuit).

1. En journée (à la lumière) : la production de glucides variés stockés ou exportés

a. Le devenir des trioses phosphates : des glucides variés (une vue d'ensemble)



⮝ **FIGURE 73. Devenir des trioses phosphates.** D'après SEGARRA *et al.* (2014)

b. Le saccharose, molécule stockée dans la vacuole et/ou exportée vers le phloème

Saccharose :

⮝ **FIGURE 74. Le saccharose.** D'après SEGARRA *et al.* (2014)

Deux modes de formation :
-

-

c. L'amidon, polymère glucidique mis en réserve dans le chloroplaste en journée

α. L'amidon, polymère glucidique de réserve (rappels)

Amidon :

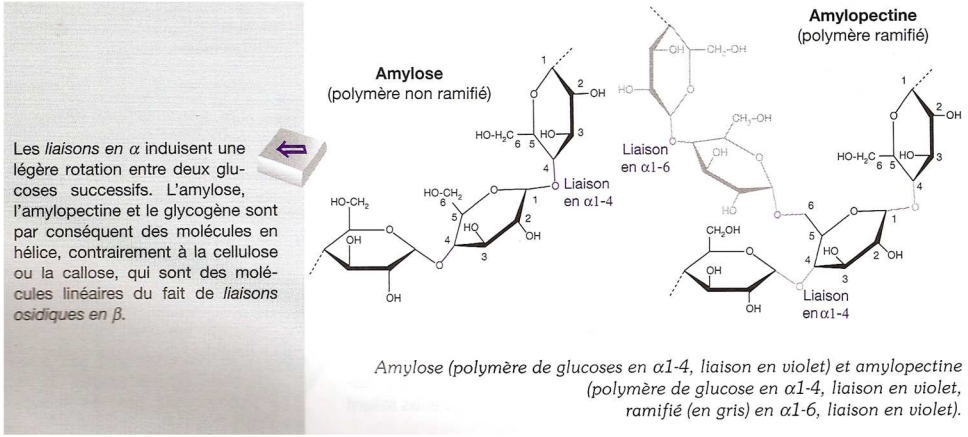
- amylose :

- amylopectine :

Relations structure-fonction (fonction de **stockage**) :
- **Polymérisation** ⇒ **réduction** drastique de la **pression osmotique** des molécules
- **Pas d'extrémités réductrices** ⇒ **faible réactivité**
- **Structures hélicoïdale** (due à l'anomère **alpha**) et **ramifiée** (branchements en **1-6**) ⇒ propices au **stockage**

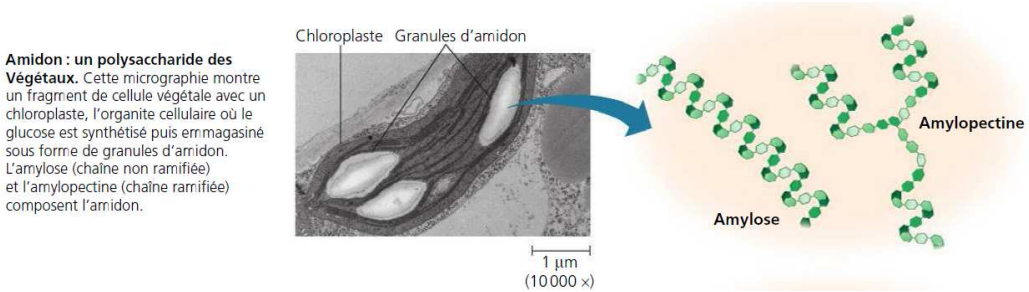
➢ L'amidon se trouve dans les **chloroplastes** sous forme de **granules** dans le **stroma** mais est surtout **stocké en grandes quantités dans les amyloplastes** (des organes-puits) sous forme paracristalline constituée de **couches concentriques**.

Réactif utile :
Eau iodée = réactif de Lugol : solution d'iodure de potassium et de diode qui **réagit avec l'amidon (coloration violette)** et le **glycogène (coloration brun-acajou)**.



Amylose (polymère de glucoses en α1-4, liaison en violet) et amylopectine (polymère de glucose en α1-4, liaison en violet, ramifié (en gris) en α1-6, liaison en violet).

Structure moléculaire
D'après DENŒUD *et al.* (2013).



Amidon : un polysaccharide des Végétaux. Cette micrographie montre un fragment de cellule végétale avec un chloroplaste, l'organite cellulaire où le glucose est synthétisé puis emmagasiné sous forme de granules d'amidon. L'amylose (chaîne non ramifiée) et l'amylopectine (chaîne ramifiée) composent l'amidon.

Structure tridimensionnelle et localisation cellulaire
D'après CAMPBELL *et al.* (2012).

FIGURE 76. L'amidon.

β. Mode de formation de l'amidon dans le chloroplaste

Synthèse chloroplastique d'amidon :
-

-

-

-

2. La nuit (à l'obscurité) : une mobilisation des réserves (notamment l'amidon chloroplastique) assurant la continuité de l'approvisionnement trophique du végétal

a. Mise en évidence d'une variabilité nycthémérale du transport glucidique et des réserves amylacées foliaires

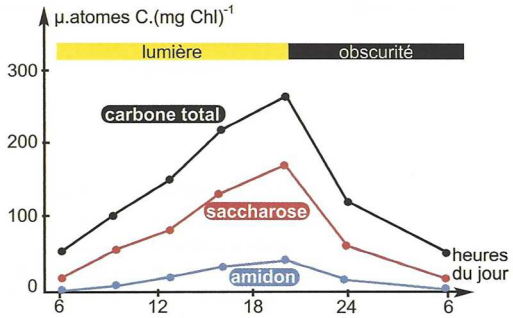
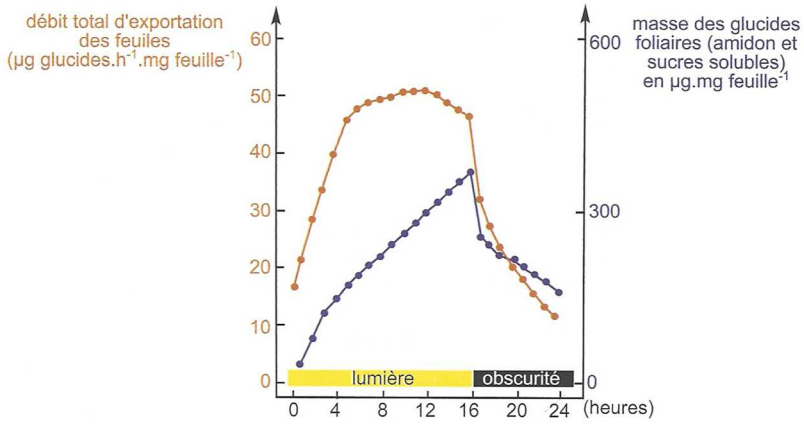


FIGURE 78. Évolution de la quantité de photoassimilats lors d'un cycle journalier (C organique total, saccharose, amidon) chez l'Orge (Poacées).
D'après PEYCRU *et al.* (2014).



Fluctuations journalières des glucides foliaires
et du débit d'exportation des feuilles chez la vesce *(D'après J. Pearson, 1974)*.

FIGURE 79. Évolution de la quantité de glucides exportés et de glucides foliaires totaux lors d'un cycle journalier chez la Vesce (Fabacées). D'après PEYCRU *et al.* (2014).

FIGURE 77. Biosynthèse d'amidon dans un chloroplaste. *Schéma original.*

Encadré O La production d'amidon dans les amyloplastes

Anticipation sur le chapitre 12

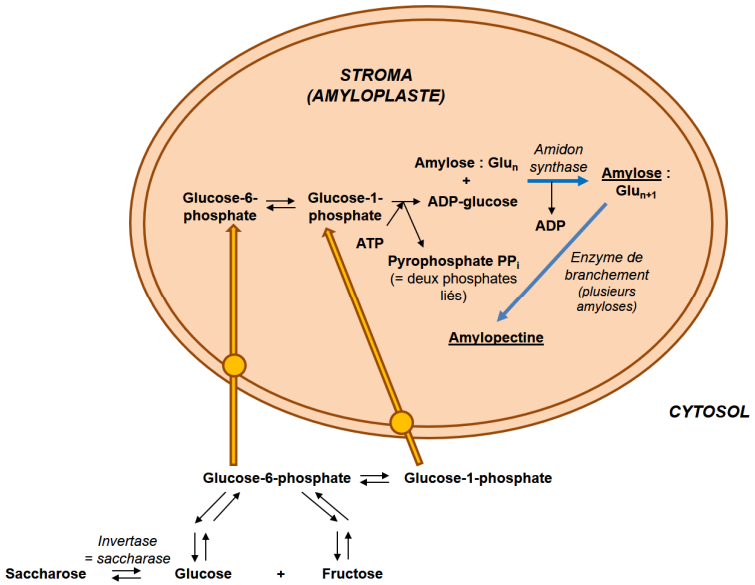


FIGURE a. Biosynthèse d'amidon dans un amyloplaste. *Schéma original.*

b. Zoom sur les mécanismes de dégradation de l'amidon : une vision d'ensemble

FIGURE 80. Principe général de mobilisation des réserves d'amidon. *Schéma original.*

3. Remarque : de jour comme de nuit, l'existence d'une activité respiratoire mitochondriale et d'activités de synthèses variées

Photosynthèse brute PB :
Respiration cellulaire R :
Photosynthèse nette PN :

Photosynthèse nette = Photosynthèse brute – Respiration

PN = PB – R

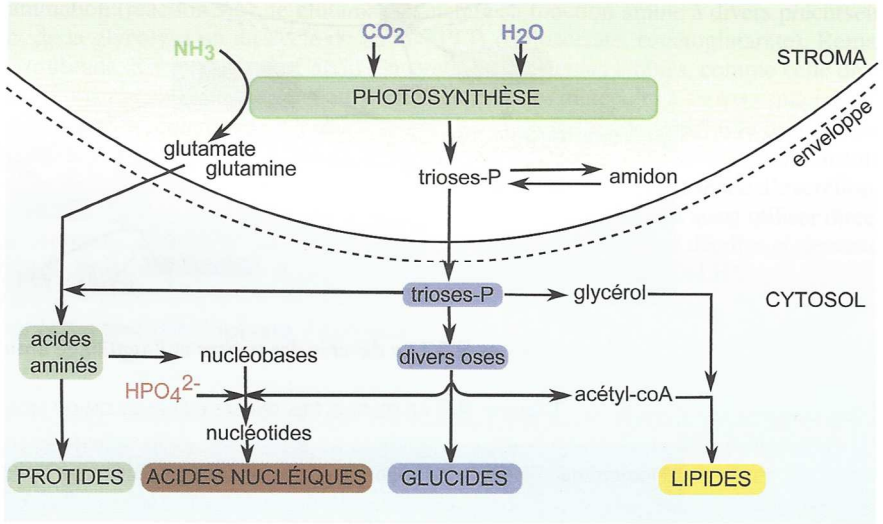


FIGURE 81. Vers la synthèse de toutes les molécules organiques.
D'après PEYCRU *et al.* (2013)

4. Bilan : une vue d'ensemble comparative du métabolisme selon les conditions d'éclairement

- Voir figure 82.

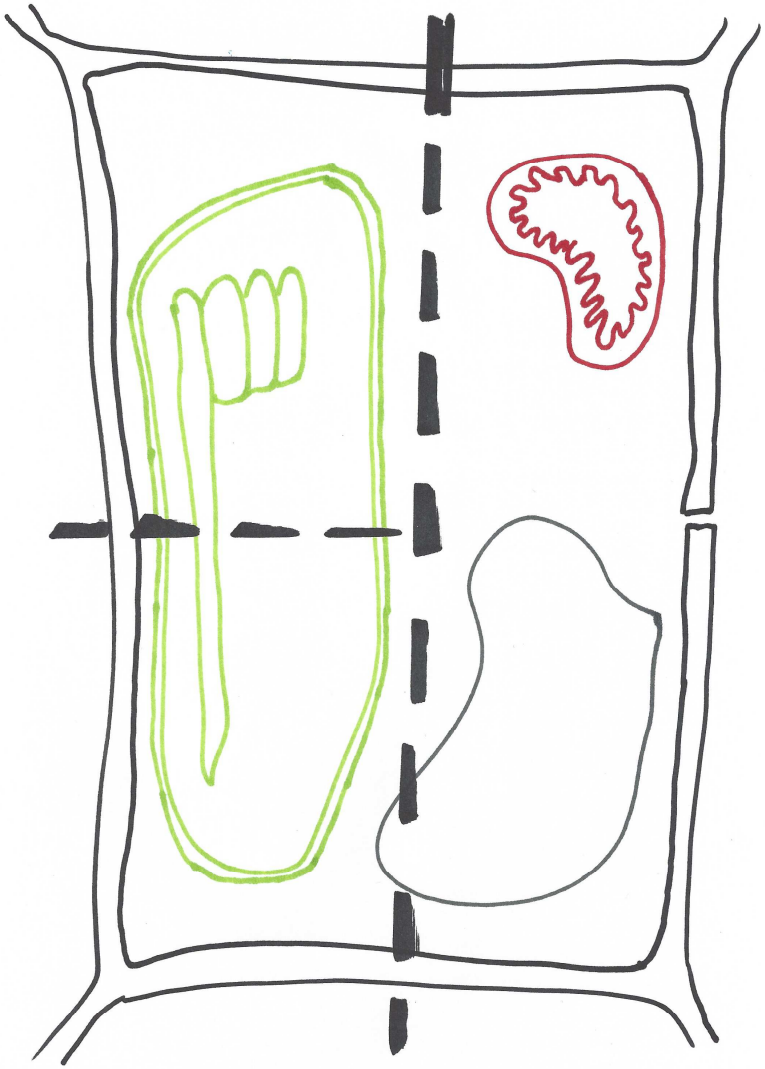
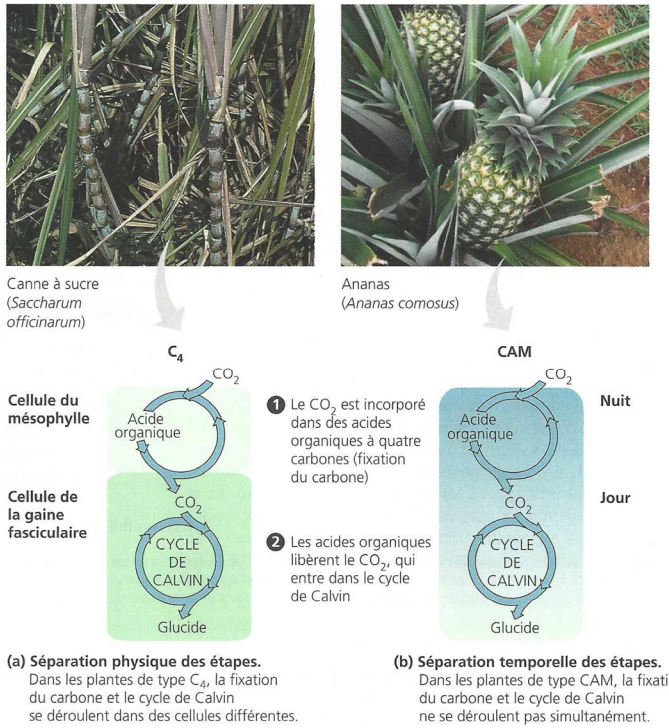


FIGURE 82. Métabolisme d'une cellule végétale chlorophyllienne : vue d'ensemble en lien avec les cycles jour-nuit. *Schéma original.*

Bilan (adapté du programme)	✓ De **jour**, la **cellule végétale (chlorophyllienne)** convertit **l'énergie lumineuse** en **énergie chimique** exploitée dans la **production de matière organique stockée** ou **exportée**. ✓ Elle réalise simultanément un **catabolisme oxydatif** et des **synthèses** diverses. ✓ À **l'obscurité**, la **cellule chlorophyllienne** adopte un **comportement hétérotrophe**. L'**amidon stocké** dans les **chloroplastes** est **dégradé**.

D. Des modalités particulières de fixation du CO_2 chez les plantes à photosynthèse en C4 et photosynthèse de type CAM [*pour information*]

Comparaison entre la photosynthèse en C_4 et le métabolisme acide crassulacéen (CAM). Les deux adaptations se caractérisent par ❶ une fixation du CO_2 dans des acides organiques, suivie ❷ d'un transfert du CO_2 au cycle de Calvin. La photosynthèse en C_4 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.



(a) Séparation physique des étapes. Dans les plantes de type C_4, la fixation du carbone et le cycle de Calvin se déroulent dans des cellules différentes.

(b) Séparation temporelle des étapes. Dans les plantes de type CAM, la fixatior du carbone et le cycle de Calvin ne se déroulent pas simultanément.

FIGURE 83. Photosynthèse en C3 et photosynthèse de type CAM [pour information].
D'après PEYCRU *et al.* (2013)

Photosynthèse en C4 :

Photosynthèse CAM :

E. Importance écosystémique de la photosynthèse : quelques remarques

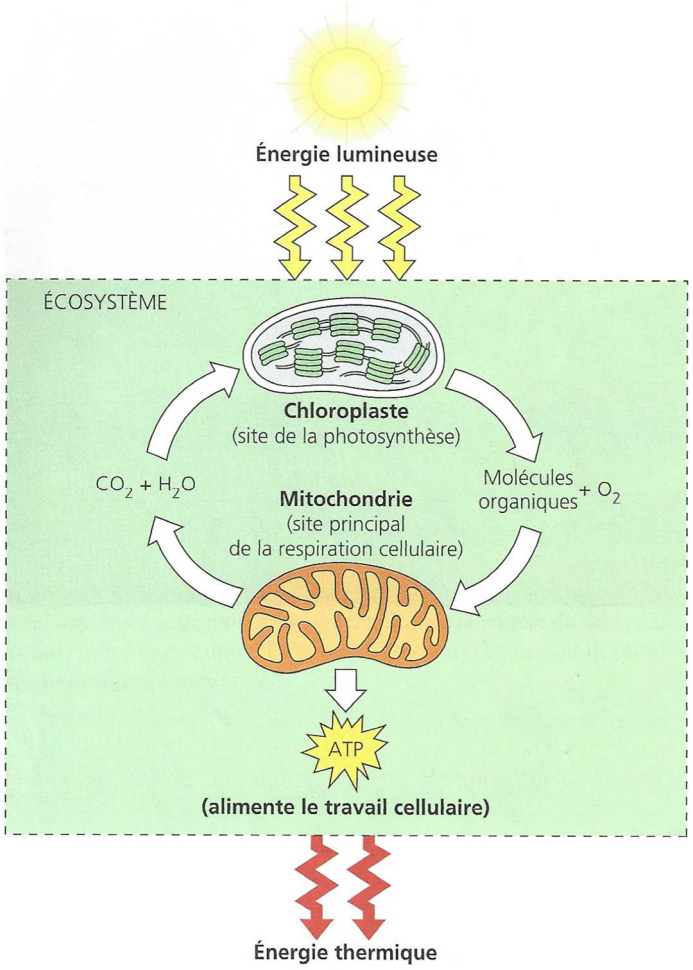


FIGURE 84. Importance écosystémique de la photosynthèse.

Encadré P Kinases, phosphorylases, phosphatases (enzymes et groupements phosphates)

Pas à remettre dans une copie, mais très utile pour comprendre les choses !

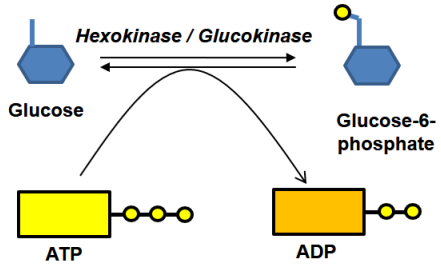
➢ Dans une cellule, les **transferts de phosphates** sont essentiellement dus à trois **types de protéines enzymatiques**. Parfois, ces termes sont improprement confondus par quelques auteurs.

Les kinases (> phosphorylation)

➢ Une **kinase** ***est une enzyme qui catalyse une phosphorylation, c'est-à-dire le transfert d'un groupement phosphate depuis un nucléotide triphosphate – l'ATP le plus souvent – vers un autre substrat ou une protéine.***

➢ Remarque : les ***protéines qui synthétisent l'ATP par phosphorylation au niveau du substrat*** sont aussi appelées **kinases** (exemple : **PEP kinase**).

(exemple : PEP kinase)

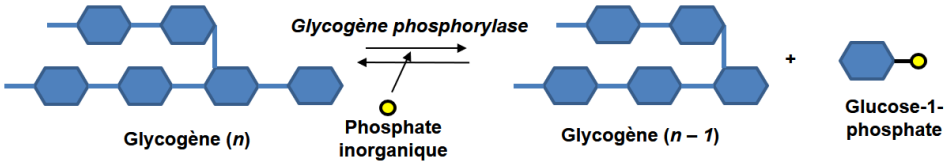


KINASE.

Les phosphorylases (> phosphorolyse)

➢ Une **phosphorylase** ***est une enzyme qui catalyse une phosphorolyse, c'est-à-dire la lyse d'une liaison covalente – souvent entre des oses – par incorporation d'un phosphate inorganique.***

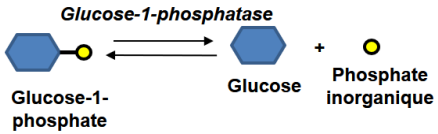
Les phosphorylases sont très répandues dans les voies de **dégradation** des **polysaccharides** comme la **glycogénolyse**.



PHOSPHORYLASE.

Les phosphatases (> déphosphorylation)

➢ Une **phosphatase** ***est une enzyme qui catalyse une déphosphorylation, c'est-à-dire l'hydrolyse d'une liaison covalente entre un phosphate et une autre molécule (liaison anhydride phosphorique).***



PHOSPHATASE.

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 1e édition française).

AUGÈRE, B. (2001). *Les enzymes, biocatalyseurs protéiques.* Ellipses, Paris.

BERGERON, J. (dir.), P. BEAUJARD, B. DAVID, A. HYON, I. BEDNAREK-MAÎTREPIERRE, 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. RAGUÉNÈS-NICOL (2015). *Biologie cellulaire et moléculaire. Tout le cours en fiches. Licence. PACES. CAPES.* 2e édition (1e édition 2012), Dunod, Paris.

BERNARD, J.-J. (2002). *Bioénergétique cellulaire.* Ellipses, Paris.

BREUIL, M. (2007). *Biologie 1re année BCPST-véto.* Tec & Doc, Lavoisier, Paris.

BREUIL, M. (2009). *Biologie 2e 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, 2e édition (1e édition 1995).

[CAMPBELL, N. A.], J. B. REECE, L. A. URY, M. L. CAIN, S. A. WASSERAMN, P. V. MINORSKY, R. B. JACKSON (2012). *Campbell Biologie.* Adaptation française J. FAUCHER & R. LACHAÎNE. Pearson, Paris (4e edition).

DAUTEL, O. (dir.), A. PROUST, M. ALGRAIN, C. BORDI, A. HELME-GUIZON, F. SAINTPIERRE, M. VABRE & C. BOGGIO (2017). *Biologie Géologie BCPST 1re année.* Vuibert, Paris.

DENŒUD, J., T. FERROIR, O. GUIPPONI, H. MOREAU, M. PAULHIAC-PISON, M.-L. PONS & F. TEJEDOR (2011). *Biologie-Géologie BCPST-véto 2e année.* Tec & Doc, Lavoisier, Paris.

DENŒUD, J., C. GODINOT, O. GUIPPONI, H. MOREAU, M. PAULHIAC-PISON & F. TEJEDOR (2013). *Biologie-Géologie BCPST-véto 1e année.* Tec & Doc, Lavoisier, Paris.

DENŒUD, J., C. GODINOT, O. GUIPPONI, H. MOREAU, M. PAULHIAC-PISON, M.-L. PONS & F. TEJEDOR (2014). *Biologie-Géologie BCPST-véto 2e année.* Tec & Doc, Lavoisier, Paris.

GODINOT, C., H. MOREAU, M. PAULHIAC-PISON & F. TEJEDOR (2010). *Biologie-Géologie 1re 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. JUSSERAND, P. PILLOT, S. RABOUIN & A. VAREILLE (2011). *Sciences de la Vie et de la Terre 1re S.* Bordas, Paris.

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, 6e édition américaine (2004) adaptée par R. LACHAÎNE.

MARIEB, E. N. & K. HOEHN (2015). *Anatomie et physiologie humaines.* Pearson, Montréal (Québec, Canada), 9e édition américaine adaptée par L. MOUSSAKOVA & R. LACHAÎNE.

MORÈRE, J.-L., R. PUJOL (coord.), J.-C. CALLEN, L. CHESNOY, J.-P. DUPONT, A.-M. GIBERT-TANGAPREGASSOM, G. RICOU, N. TOUZET (dir.) et colloborateurs (2003). *Dictionnaire raisonné de Biologie.* Frison-Roche, Paris.

PÉRILLEUX, É., D. RICHARD, B. ANSELME, J.-M. DEMONT & P. VALET (2002). *Biologie humaine. Anatomie, physiologie, santé.* Nathan, Paris, 2e édition.

PEYCRU, P. (dir.), J.-F. FOGELGESANG, D. GRANDPERRIN, B. AUGÈRE, J.-C. BAEHR, C. PERRIER, J.-M. DUPIN & C. VAN DER REST (2010*a*). *Biologie tout-en-un BCPST 1re année.* Dunod, Paris, 2e édition (2009), réimpression corrigée (2010) (1e édition 2006).

PEYCRU, P. (dir.), J.-C. BAEHR, F. CARIOU, D. GRANDPERRIN, C. PERRIER, J.-F. FOGELGESANG & J.-M. DUPIN (2010*b*). *Biologie tout-en-un BCPST 2e année.* Dunod, Paris, 2e édition (1e 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 1re année.* Dunod, Paris, 3e édition (1e 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 2e année.* Dunod, Paris, 3e édition (1e édition 2007).

RAVEN, P. H., G. B. JOHNSON, J. B. LOSOS, S. S. SINGER (2007). *Biologie.* De Boeck, Bruxelles.

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, 2e édition (1e 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, 3e édition (1e 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, 2e édition (1e édition 1982).

RIEUTORT, M. (1999). *Physiologie animale. **2.** Les grandes fonctions.* Mise à jour D. PICHARD. Masson, Paris, 2e édition (1e édition 1982).

SAINTPIERRE, F., C. BORDI (dir.), M. ALGRAIN, Y. KRAUSS, I. MOLLIÈRE & H. CLAUCE (2017). *Mémento Biologie BCPST 1re et 2e années.* Vuibert, Paris.

SEGARRA, J. (dir.), É. CHAUVET, C. COLSON-PROCH, M. HUILLE, M. LABROUSSE, F. LOUET, F. METZ & E. PIÈTRE (2014). *Biologie BCPST 1re année.* Ellipses, Paris.

SEGARRA, J., E. PIÈTRE (dir.), G. BAILLY, O. CHASSAING, D. FAVRE, T. JEAN, F. METZ & C. MEUNIER (2015). *Biologie BCPST 2e année.* 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, 4e édition américaine traduite sous la dir. de J.-F. BRUN.

TAIZ, L. & E. ZEIGER (dir.) (2010). *Plant physiology.* Sinauer Associates, Sunderland (Massachussetts, USA), 5e édition (1e 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, 6e édition.

VOET, D. & J. G. VOET (2005). *Biochimie.* De Boeck, Bruxelles (B), 2e édition française [3e édition américaine, John Wiley and sons, New York, USA, 2004. Traduction G. ROUSSEAU & L. DOMENJOUD].

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.

- L'énergie dans la cellule : notions élémentaires
° Réaction d'**oxydo-réduction** / loi du **gamma**
[Idée que **le catabolisme oxyde** / **l'anabolisme réduit** les molécules]
° Principaux types de **couplages énergétiques**
° Principe d'un **couplage énergétique (ΔG1 / ΔG2)**

- Formes d'énergie dans la cellule
° Penser aux schémas des principaux coenzymes redox.
° **Échelle** de **potentiels redox** (avec les principaux couples à resituer)
° **Schéma-bilan** associé
[Pouvoir donner des exemples au programme de chaque type énergétique… Facile, il y en a plein]

- L'ATP dans la cellule
Le plan peut servir pour une synthèse sur l'ATP !
Il faudrait en outre réinjecter quelques schémas de photosynthèse et de respiration.
° **Molécule d'ATP** simplifiée
° Valeur du **potentiel d'hydrolyse** et positionnement sur une **échelle de tels potentiels**
[° Expérience historique de **JAGENDROF & URIBE**]

° Schéma simple de l'**ATP synthase** + éventuellement schéma de **fonctionnement** (encadré)
° Mécanisme de la **phosphorylation oxydative**
° Mécanisme de la **photophosphorylation** >> *cf.* photosynthèse
° **Phosphorylation au niveau du substrat** : connaître les 3 exemples
° Positionnement de ces **processus de formation de l'ATP** dans les **voies métaboliques**
° **Utilisations** de l'ATP, notamment **travaux chimiques**, **osmotiques**, **mécaniques**
*[Savoir citer et illustrer les **autres utilisations** : 2nd messager, rôle de contrôle métabolique, monomère de l'ARN...]*

- La cellule musculaire striée squelettique
° Schéma de l'organisation du **muscle** à **toutes les échelles**
° Schéma d'un **sarcomère** ; savoir schématiser le **raccourcissement**
° Schéma du **cycle contractile**
° Schéma des **voies cataboliques dans la CMSS**
° Graphe montrant **l'utilisation séquentielle de ces voies**
° Graphe montrant la **dette en dioxygène**
[Revoir TB1 : **synapse neuro-musculaire**]

- La respiration + autres voies du catabolisme oxydatif
[Équation-bilan à connaître + équations des étapes intermédiaires]
° Vue d'ensemble de la **respiration cellulaire** (sens large)
° Existence d'**autres voies** d'entrée dans le **catabolisme oxydatif** : à simplifier
° **Glycolyse** : vision simplifiée (**investissement** / **remboursement** de l'énergie // bien noter le **bilan énergétique**, où intervient l'**ATP**, où intervient le **coenzyme redox**)
° Points de **contrôle** de la **glycolyse**
>> Savoir refaire les **schémas** / **courbes** sur la **PFK1** vus plus haut
° Transformation de l'**acétyl-CoA** en **pyruvate**, **entrée** dans la **mitochondrie**
° Structure d'une **mitochondrie**
° **Fermentations lactique**
° **Cycle de Krebs** résumé / simplifié : bien noter la **production d'ATP** et de **coenzymes réduits**
° **Chaîne respiratoire** (simplifiée ou non)
° **Diagramme énergétique** de la chaîne **respiratoire** (simplifié ou non)
° **Rendement énergétique** de l'oxydation d'une molécule de **glucose** (**comparaison fermentation-respiration**)
° **Hélice de Lynen**

- La photosynthèse
[Équation-bilan à connaître + équation des étapes intermédiaires]
° Structure d'un **chloroplaste**
*[Savoir expliquer les **relations structure-fonction** au niveau d'une **feuille**… au passage, super plan de synthèse sur la feuille]*
° **CT** de **feuille** d'**Angiosperme**
[° **Spectre d'action** de la photosynthèse ?]
[° Expérience de **Engelmann**]
[° **Chlorophylle** à simplifier > importance des **doubles liaisons**]
° **Diagramme énergétique** de la **chaîne photosynthétique** (simplifié ou non)
° **Chaîne photosynthétique** (simplifiée ou non)
*[Comprendre les **expériences de Calvin** et savoir en exploiter les résultats]*
° **Cycle de Calvin-Benson** (bien noter le **nombre de carbones**) et son **équation**
° Devenir des **trioses phosphates** (simplifiable)
° Résumé de la **photosynthèse en C3** : les grandes idées sont sur le schéma !
° **Schéma-bilan jour/nuit** du **métabolisme** de la **cellule végétale**

Vous devez en outre **savoir** / **pouvoir**
° Exploiter des **résultats expérimentaux** historiques ou non en lien avec les **voies métaboliques** au programme
° Exploiter des **électronographies** de **cellules**, de **mitochondries**, de **chloroplastes**
° Exploiter des coupes de **feuilles** (TP 2.5)
° Exploiter et comprendre des **spectres d'absorption** de **pigments** / un **spectre d'action** (TP 1.4)
…

Plan du chapitre

Objectifs : extraits du programme 1
Introduction 2

I. Quelques notions préliminaires sur le fonctionnement énergétique et métabolique des cellules 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 4
E. Le rôle central des enzymes dans la réalisation et le contrôle des réactions chimiques du vivant 5
F. La cellule eucaryote, une cellule compartimentée où se déroulent de nombreuses réactions anaboliques et cataboliques 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 6
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 9
1. L'emploi de pouvoir réducteur (énergie chimique) : réactions d'oxydoréduction et importance des coenzymes d'oxydoréduction 9
2. L'utilisation de gradients chimiques ou électrochimiques membranaires (énergie osmotique) 10
3. L'utilisation de nucléosides triphosphates, notamment l'ATP (énergie chimique) 10
4. Proposition de bilan 11
H. Un positionnement métabolique central de l'ATP 11
1. L'ATP, molécule dont l'hydrolyse est fortement exergonique 11
a. Un nucléoside triphosphate 11
b. Une molécule à haut potentiel d'hydrolyse des liaisons anhydride phosphorique, libérant plus de 30 kJ • mol^{-1} en conditions standard 12
c. Un potentiel d'hydrolyse intermédiaire parmi les molécules de transfert de groupement phosphate 12
2. L'ATP, molécule régénérable par divers processus 13
a. Trois modalités de régénération 13
α. La phosphorylation oxydative, un couplage globalement chimiochimique permis par la chaîne respiratoire et l'ATP synthase 13
β. La photophosphorylation, un couplage globalement photochimique permis par la chaîne photosynthétique et l'ATP synthase 15
γ. La phosphorylation au niveau du substrat (= transphosphorylation), un couplage chimiochimique où le phosphate est transféré d'une molécule phosphorylée vers l'ADP 16
δ. Bilan 16
b. Les voies métaboliques impliquant la régénération d'ATP 16
3. L'ATP, une molécule aux multiples usages dans la cellule 17
a. Une molécule source d'énergie de nombreuses activités cellulaires 17
α. La synthèse de molécules organiques variées et de polymères : travaux chimiques (couplage chimio-chimique) 17
β. Le déplacement de compartiments et le mouvement : travaux mécaniques (couplage chimio-mécanique) 17
γ. Le déplacement transmembranaire d'une substance contre son gradient chimique ou électrochimique : travaux osmotiques (couplage chimio-osmotique) 17
b. Autres usages cellulaires de l'ATP 17
α. Un nucléotide polymérisable en ARN 17
β. Un précurseur de l'AMPc, un second messager 17
γ. Une molécule de contrôle du métabolisme 17
i. Un contrôle direct inhibiteur ou activateur de l'activité enzymatique 17
ii. Une participation au contrôle par modification covalente des enzymes 17

II. L'oxydation des molécules organiques et la production d'ATP : le catabolisme oxydatif étudié dans le contexte de la cellule musculaire striée squelettique 18
A. La cellule musculaire striée squelettique, un exemple de cellule à haute consommation d'ATP 18
1. Les muscles squelettiques, organes arrimés au squelette dont ils déplacent les segments les uns par rapport aux autres par leur contraction 18
a. Les muscles, des organes ancrés aux os par des structures conjonctives résistantes nommées tendons 18
b. Les muscles, des organes dont la contraction assure un déplacement rectiligne d'une partie du corps par rapport à une autre (mouvement) 19
2. Une contractilité musculaire que se déploie à toutes les échelles 19
a. Un organe allongé composé de tissu conjonctif et de fibres musculaires rectilignes 19
b. Des fibres musculaires dont les myofibrilles peuvent se raccourcir 20
c. Des myofibrilles dont les unités de raccourcissement sont des sarcomères 21
3. Un raccourcissement global de l'organe permis par le glissement des myofilaments de myosine sur les myofilaments d'actine au sein des sarcomères : la contraction 23
a. Une différence observable en microscopie électronique entre l'état contracté et l'état relâché des sarcomères 24
b. Un glissement des filaments fins d'actine sur les filaments épais de myosine : la « contraction cytosquelettique » 24
c. Un processus séquentiel dépendant d'ions calcium et d'ATP 25
α. Le calcium, ion se liant à la troponine et déclenchant la mise à nu par la tropomyosine des sites de fixation actine-myosine 25
β. L'ATP, molécule centrale du cycle d'interaction actine-myosine (couplage chimio-mécanique) 26
4. Une contraction des fibres musculaires qui répond à un message nerveux : le couplage excitation-contraction 26
5. Une contraction qui consomme de l'ATP : le catabolisme de la cellule musculaire striée squelettique 26
a. La multiplicité des voies métaboliques dans la cellule musculaire : voies anaérobies alactiques (dont créatine phosphate), voies anaérobie lactique (fermentation) et voie aérobie (respiration cellulaire) 26
b. Une intervention séquentielle de ces voies métaboliques lors d'un effort prolongé en lien avec les conditions d'approvisionnement en O_2 des tissus 29
c. Une prépondérance des voies qui définit plusieurs types cellulaires de fibres musculaires 30
d. Un retour aux conditions initiales après un exercice musculaire notamment caractérisé par le remboursement d'une dette en dioxygène 30
α. L'arrêt de la contraction : mécanismes de la relaxation 30

β. L'existence d'une dette en dioxygène dont le remboursement assure la reconstitution du stock de créatine phosphate et l'élimination du lactate sanguin 30
B. Le catabolisme oxydatif : une vue d'ensemble 31
1. La notion de respiration cellulaire : une oxydation complète de la matière organique 31
2. L'exemple du catabolisme du glucose : une vision globale 31
a. Équation-bilan de la respiration cellulaire (sens large) 31
b. Trois étapes principales 31
α. La glycolyse cytosolique 32
β. Le cycle de KREBS au niveau de la matrice mitochondriale 32
γ. La chaîne respiratoire et la phosphorylation oxydative au niveau de l'espace intermembranaire 32
c. L'existence d'oxydations incomplètes et anaérobies de matière organique : les fermentations 32
d. Les voies anaérobies alactiques, un cas particulier des cellules musculaires 32
3. L'existence d'autres voies d'entrée dans le catabolisme oxydatif 33
C. La glycolyse, une oxydation partielle du glucose en pyruvate 33
1. Une dizaine de réactions que l'on peut diviser en deux phases clefs : investissement puis remboursement d'énergie 34
2. Le contrôle de la glycolyse 36
D. Le devenir du pyruvate 38
1. En conditions aérobies : entrée dans la mitochondrie et conversion en acétyl-CoA avec production de pouvoir réducteur (NADH,H^+) 38
2. En conditions anaérobies chez certaines cellules : la fermentation qui ré-oxyde les coenzymes préalablement réduits par la glycolyse 39
a. Deux types de fermentations en fonction du produit formé : la fermentation alcoolique et la fermentation lactique 39
b. Intérêts biologiques de la fermentation 39
E. Dans les mitochondries : une oxydation complète des substrats organiques (respiration cellulaire au sens strict) 40
1. Rappels sur la structure des mitochondries 40
2. Le cycle de Krebs : un ensemble de réactions matricielles cycliques produisant une importante quantité de pouvoir réducteur 40
3. La conversion du pouvoir réducteur en une importante quantité d'ATP : chaîne respiratoire et phosphorylation oxydative 42
a. L'établissement d'un gradient de protons dans l'espace intermembranaire : un couplage chimio-osmotique entre oxydation des coenzymes et flux de protons 42
α. Principe général 42
β. Composition et fonctionnement de la chaîne respiratoire 43
γ. Un transfert des électrons selon un gradient de potentiels redox croissants 44
b. L'emploi du gradient de protons dans la phosphorylation d'ADP en ATP par l'ATP synthétase : un couplage osmochimique 44
F. Bilan énergétique comparé de la respiration cellulaire au sens large et de la fermentation dans le cas d'une molécule de glucose 45
1. Cas de la respiration cellulaire (sens large) 45
2. Cas des fermentations 46
G. Le cas de l'oxydation catabolique des acides gras (AG) : l'hélice de LYNEN ou bêta-oxydation des acides gras 46
1. Un processus mitochondrial ou péroxysomique permettant la production de pouvoir réducteur 46
2. Un processus qui suppose une oxydation progressive d'un acide gras « activé » 46
3. Un processus qui produit du pouvoir réducteur (NADH, H^+ ; $FADH_2$) ensuite utilisé par la respiration mitochondriale 46
H. Bilan sur le fonctionnement énergétique de la cellule musculaire striée squelettique 47
III. Le métabolisme autotrophe des cellules végétales : réduction du carbone d'origine minérale à la lumière 47
A. La plante, organisme constitué de tissus autotrophes et hétérotrophes, ce qui suppose des corrélations trophiques entre cellules 47
B. La réduction du CO_2 et la synthèse glucidique en présence de lumière : la photosynthèse en C3 48
1. La photosynthèse, une réduction du CO_2 en matière organique au moyen de l'énergie lumineuse qui a lieu dans les chloroplastes 48
2. La phase photochimique de la photosynthèse : captation et conversion d'énergie lumineuse en ATP et pouvoir réducteur (couplage photochimique) au niveau des thylakoïdes 49
a. Des structures favorisant la captation de lumière : localisation du processus aux différentes échelles 49
α. À l'échelle de l'organe : la feuille, organe aplati et fin favorisant la captation de lumière 49
β. À l'échelle du tissu : la feuille, un organe riche en parenchyme chlorophyllien 50
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 50
δ. Des pigments riches en liaisons conjuguées dont le spectre d'absorption correspond au spectre d'action de la photosynthèse 51
b. Des mécanismes permettant la conversion de l'énergie lumineuse en ATP et pouvoir réducteur (couplage globalement photochimique) 52
α. Une conversion photochimique assurée par des photosystèmes (PS) 52
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) 53
i. Diversité des composants de la chaîne photosynthétique et diagrammes énergétiques : notions de trajet acyclique (= schéma en Z) et de trajet cyclique 53
ii. Résultat du fonctionnement de la chaîne photosynthétique : production de pouvoir réducteur et d'un gradient de protons 55
γ. Un gradient de protons utilisé dans la synthèse d'ATP par l'ATP synthase (couplage osmo-chimique) 55
c. Bilan de la phase photochimique 55
3. 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) 55
a. Les expériences de CALVIN et la mise en évidence des réactions de la phase chimique 55
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 56
c. La dualité carboxylase-oxydase de la RuBisCO et la photorespiration [*hors programme ?*] 58
4. Vision synthétique de la photosynthèse et couplage des phases photochimique et chimique 59
C. Le devenir des trioses phosphates et les conséquences de l'alternance jour-nuit dans les cellules chlorophylliennes 59
1. En journée (à la lumière) : la production de glucides variés stockés ou exportés 59
a. Le devenir des trioses phosphates : des glucides variés (une vue d'ensemble) 59
b. Le saccharose, molécule stockée dans la vacuole et/ou exportée vers le phloème 60
c. L'amidon, polymère glucidique mis en réserve dans le chloroplaste en journée 60
α. L'amidon, polymère glucidique de réserve (rappels) 60
β. Mode de formation de l'amidon dans le chloroplaste 61
2. La nuit (à l'obscurité) : une mobilisation des réserves (notamment l'amidon chloroplastique) assurant la continuité de l'approvisionnement trophique du végétal 62
a. Mise en évidence d'une variabilité nycthémérale du transport glucidique et des réserves amylacées foliaires 62
b. Zoom sur les mécanismes de dégradation de l'amidon : une vision d'ensemble 63

3. Remarque : de jour comme de nuit, l'existence d'une activité respiratoire mitochondriale et d'activités de synthèses variées 63
4. Bilan : une vue d'ensemble comparative du métabolisme selon les conditions d'éclairement 63
D. Des modalités particulières de fixation du CO_2 chez les plantes à photosynthèse en C4 et photosynthèse de type CAM [*pour information*] 64
E. Importance écosystémique de la photosynthèse : quelques remarques 65

Références 67
Pour faire une fiche de révision : quelques pistes 67
Plan du chapitre 69
Plan simplifié (3 niveaux de plan) 71
Plan très simplifié (2 niveaux de plan) 73

Plan simplifié (3 niveaux de plan)

Objectifs : extraits du programme 1
Introduction 2

I. Quelques notions préliminaires sur le fonctionnement énergétique et métabolique des cellules 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 4
E. Le rôle central des enzymes dans la réalisation et le contrôle des réactions chimiques du vivant 5
F. La cellule eucaryote, une cellule compartimentée où se déroulent de nombreuses réactions anaboliques et cataboliques 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 6
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 9
1. L'emploi de pouvoir réducteur (énergie chimique) : réactions d'oxydoréduction et importance des coenzymes d'oxydoréduction 9
2. L'utilisation de gradients chimiques ou électrochimiques membranaires (énergie osmotique) 10
3. L'utilisation de nucléosides triphosphates, notamment l'ATP (énergie chimique) 10
4. Proposition de bilan 11
H. Un positionnement métabolique central de l'ATP 11
1. L'ATP, molécule dont l'hydrolyse est fortement exergonique 11
2. L'ATP, molécule régénérable par divers processus 13
3. L'ATP, une molécule aux multiples usages dans la cellule 17

II. L'oxydation des molécules organiques et la production d'ATP : le catabolisme oxydatif étudié dans le contexte de la cellule musculaire striée squelettique 18
A. La cellule musculaire striée squelettique, un exemple de cellule à haute consommation d'ATP 18
1. Les muscles squelettiques, organes arrimés au squelette dont ils déplacent les segments les uns par rapport aux autres par leur contraction 18
2. Une contractilité musculaire que se déploie à toutes les échelles 19
3. Un raccourcissement global de l'organe permis par le glissement des myofilaments de myosine sur les myofilaments d'actine au sein des sarcomères : la contraction 23
4. Une contraction des fibres musculaires qui répond à un message nerveux : le couplage excitation-contraction 26
5. Une contraction qui consomme de l'ATP : le catabolisme de la cellule musculaire striée squelettique 26

B. Le catabolisme oxydatif : une vue d'ensemble **31**
1. La notion de respiration cellulaire : une oxydation complète de la matière organique 31
2. L'exemple du catabolisme du glucose : une vision globale 31
3. L'existence d'autres voies d'entrée dans le catabolisme oxydatif 33
C. La glycolyse, une oxydation partielle du glucose en pyruvate **33**
1. Une dizaine de réactions que l'on peut diviser en deux phases clefs : investissement puis remboursement d'énergie 34
2. Le contrôle de la glycolyse 36
D. Le devenir du pyruvate **38**
1. En conditions aérobies : entrée dans la mitochondrie et conversion en acétyl-CoA avec production de pouvoir réducteur ($NADH,H^+$) 38
2. En conditions anaérobies chez certaines cellules : la fermentation qui ré-oxyde les coenzymes préalablement réduits par la glycolyse 39
E. Dans les mitochondries : une oxydation complète des substrats organiques (respiration cellulaire au sens strict) **40**
1. Rappels sur la structure des mitochondries 40
2. Le cycle de Krebs : un ensemble de réactions matricielles cycliques produisant une importante quantité de pouvoir réducteur 40
3. La conversion du pouvoir réducteur en une importante quantité d'ATP : chaîne respiratoire et phosphorylation oxydative 42
F. Bilan énergétique comparé de la respiration cellulaire au sens large et de la fermentation dans le cas d'une molécule de glucose **45**
1. Cas de la respiration cellulaire (sens large) 45
2. Cas des fermentations 46
G. Le cas de l'oxydation catabolique des acides gras (AG) : l'hélice de LYNEN ou bêta-oxydation des acides gras **46**
1. Un processus mitochondrial ou péroxysomique permettant la production de pouvoir réducteur 46
2. Un processus qui suppose une oxydation progressive d'un acide gras « activé » 46
3. Un processus qui produit du pouvoir réducteur ($NADH$, H^+ ; $FADH_2$) ensuite utilisé par la respiration mitochondriale 46
H. Bilan sur le fonctionnement énergétique de la cellule musculaire striée squelettique **47**

III. Le métabolisme autotrophe des cellules végétales : réduction du carbone d'origine minérale à la lumière **47**
A. La plante, organisme constitué de tissus autotrophes et hétérotrophes, ce qui suppose des corrélations trophiques entre cellules **47**
B. La réduction du CO_2 et la synthèse glucidique en présence de lumière : la photosynthèse en C3 **48**
1. La photosynthèse, une réduction du CO_2 en matière organique au moyen de l'énergie lumineuse qui a lieu dans les chloroplastes 48
2. La phase photochimique de la photosynthèse : captation et conversion d'énergie lumineuse en ATP et pouvoir réducteur (couplage photochimique) au niveau des thylakoïdes 49
3. 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) 55
4. Vision synthétique de la photosynthèse et couplage des phases photochimique et chimique 59
C. Le devenir des trioses phosphates et les conséquences de l'alternance jour-nuit dans les cellules chlorophylliennes **59**
1. En journée (à la lumière) : la production de glucides variés stockés ou exportés 59
2. La nuit (à l'obscurité) : une mobilisation des réserves (notamment l'amidon chloroplastique) assurant la continuité de l'approvisionnement trophique du végétal 62
3. Remarque : de jour comme de nuit, l'existence d'une activité respiratoire mitochondriale et d'activités de synthèses variées 63
4. Bilan : une vue d'ensemble comparative du métabolisme selon les conditions d'éclairement 63
D. Des modalités particulières de fixation du CO_2 chez les plantes à photosynthèse en C4 et photosynthèse de type CAM [*pour information*] **64**
E. Importance écosystémique de la photosynthèse : quelques remarques **65**

Références **67**
Pour faire une fiche de révision : quelques pistes **67**
Plan du chapitre **69**
Plan simplifié (3 niveaux de plan) **71**
Plan très simplifié (2 niveaux de plan) **73**

Plan très simplifié (2 niveaux de plan)

Objectifs : extraits du programme 1
Introduction 2

I. Quelques notions préliminaires sur le fonctionnement énergétique et métabolique des cellules 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. La cellule eucaryote, une cellule compartimentée où se déroulent de nombreuses réactions anaboliques et cataboliques** 5
- **G. Les trois principales formes d'énergie directement utilisables dans les activités cellulaires** 9
- **H. Un positionnement métabolique central de l'ATP** 11

II. L'oxydation des molécules organiques et la production d'ATP : le catabolisme oxydatif étudié dans le contexte de la cellule musculaire striée squelettique 18
- **A. La cellule musculaire striée squelettique, un exemple de cellule à haute consommation d'ATP** 18
- **B. Le catabolisme oxydatif : une vue d'ensemble** 31
- **C. La glycolyse, une oxydation partielle du glucose en pyruvate** 33
- **D. Le devenir du pyruvate** 38
- **E. Dans les mitochondries : une oxydation complète des substrats organiques (respiration cellulaire au sens strict)** 40
- **F. Bilan énergétique comparé de la respiration cellulaire au sens large et de la fermentation dans le cas d'une molécule de glucose** 45
- **G. Le cas de l'oxydation catabolique des acides gras (AG) : l'hélice de LYNEN ou bêta-oxydation des acides gras** 46
- **H. Bilan sur le fonctionnement énergétique de la cellule musculaire striée squelettique** 47

III. Le métabolisme autotrophe des cellules végétales : réduction du carbone d'origine minérale à la lumière 47
- **A. La plante, organisme constitué de tissus autotrophes et hétérotrophes, ce qui suppose des corrélations trophiques entre cellules** 47
- **B. La réduction du CO_2 et la synthèse glucidique en présence de lumière : la photosynthèse en C3** 48
- **C. Le devenir des trioses phosphates et les conséquences de l'alternance jour-nuit dans les cellules chlorophylliennes** 59
- **D. Des modalités particulières de fixation du CO_2 chez les plantes à photosynthèse en C4 et photosynthèse de type CAM [*pour information*]** 64
- **E. Importance écosystémique de la photosynthèse : quelques remarques** 65

Références 67
Pour faire une fiche de révision : quelques pistes 67
Plan du chapitre 69
Plan simplifié (3 niveaux de plan) 71
Plan très simplifié (2 niveaux de plan) 73

© 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 mars 2016 (version ATS Bio) • Refondu et modifié en septembre 2017.
Dernière actualisation : mars 2020.
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.