

Chapitre 10

Photosynthèse

PowerPoint® Lecture Presentations for

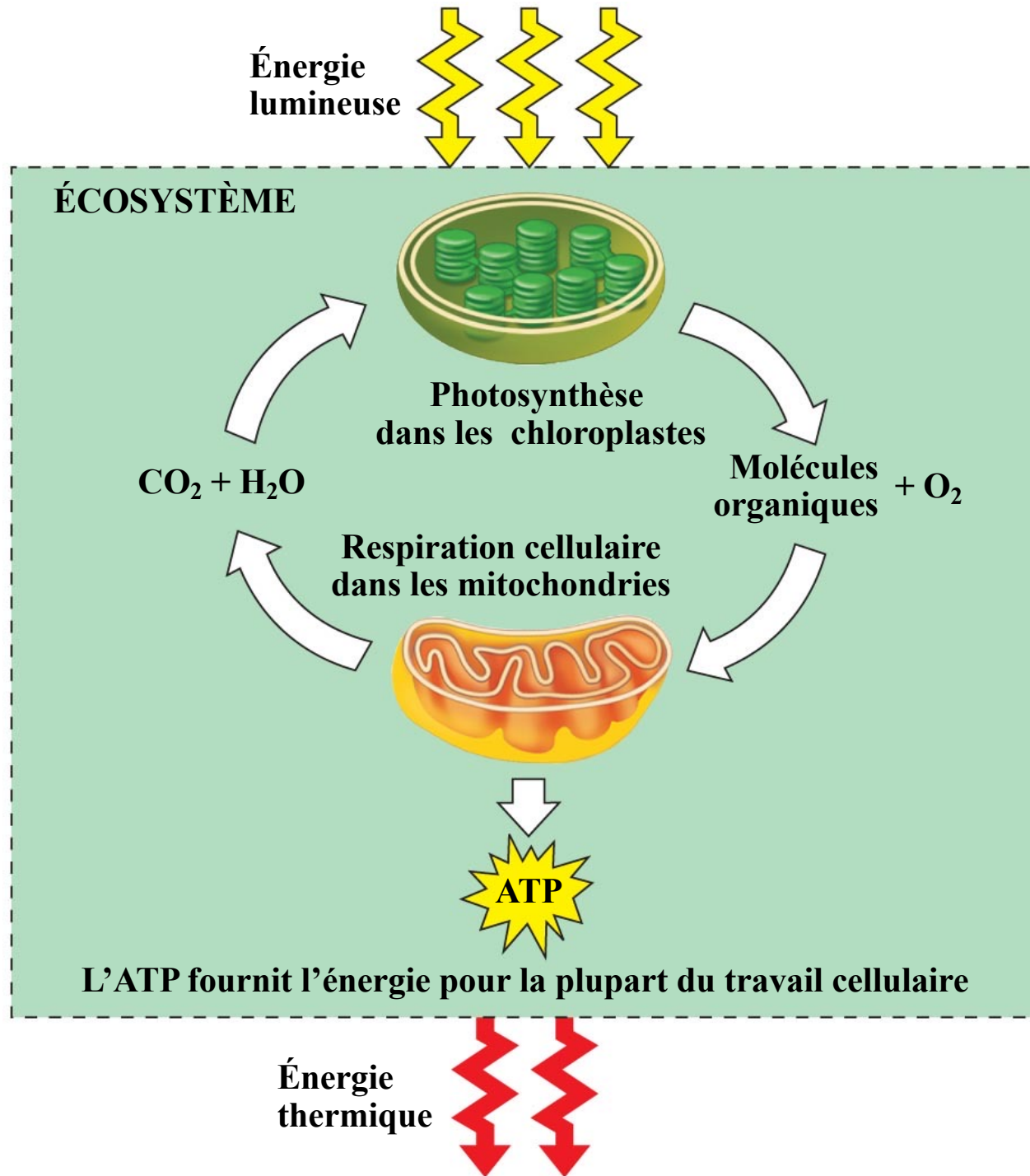
Biology

Eighth Edition

Neil Campbell and Jane Reece

Lectures by Chris Romero, updated by Erin Barley with contributions from Joan Sharp

Fig. 9-2



Introduction: Les processus qui nourrissent la biosphère

- **La photosynthèse** est le processus qui convertit l'énergie solaire en énergie chimique.
- Directement ou indirectement, la photosynthèse nourrit presque toute la biosphère.
- Plus de 10^{17} kcal d'énergie libre est emmagasinée chaque année par la photosynthèse qui fixe également 10^{10} tonnes de carbone par an.



Copyright © 2008 Pearson Education, Inc., publishing as Pearson Benjamin Cummings.

-
- **Les autotrophes** sont autosuffisants dans le sens où ils n'ont pas besoin de manger d'autres organismes ou substances dérivées de ces organismes.
 - Les autotrophes sont les *producteurs* de la biosphère en produisant des molécules organiques à partir de CO₂ et d'autres molécules inorganiques.
 - Presque toutes les plantes sont des **photo**-autotrophes qui utilisent l'énergie du soleil pour fabriquer des molécules organiques à partir de H₂O et de CO₂.
 - Ces organismes se nourrissent eux-mêmes et nourrissent la planète toute entière.
-

Fig. 10-2



(a) Plantes

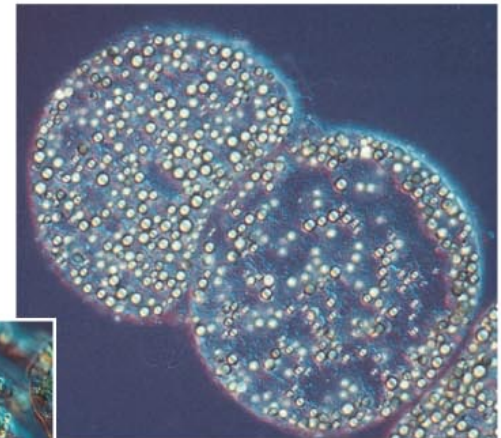


(b) Algues multicellulaires



(c) Protistes unicellulaires

10 μm



(e) Bactéries
pourpres sulfureuses

1.5 μm



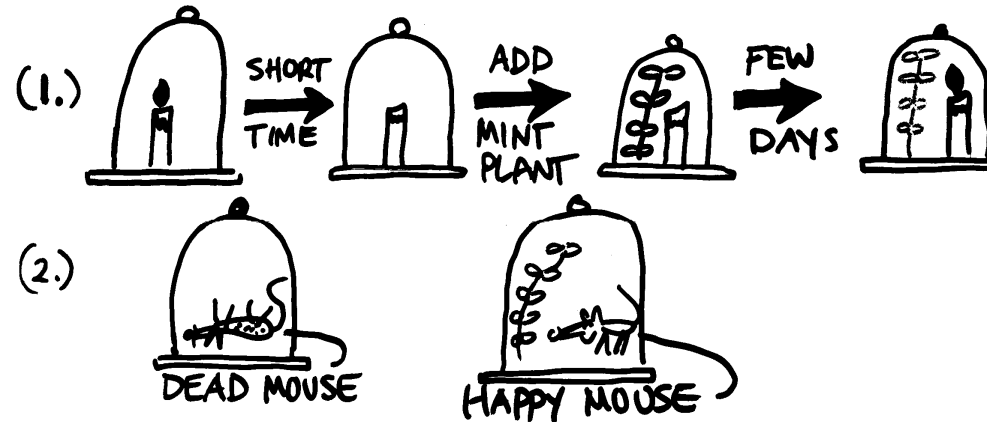
(d) Cyanobactéries

40 μm

-
- **Les hétérotrophes** obtiennent leur matériel organique d'autres organismes
 - Les hétérotrophes sont les *consommateurs* de la biosphère.
 - Presque tous les hétérotrophes, y compris les humains, dépendent des photoautotrophes pour leur nourriture et leur O₂.
-

La découverte de la photosynthèse...

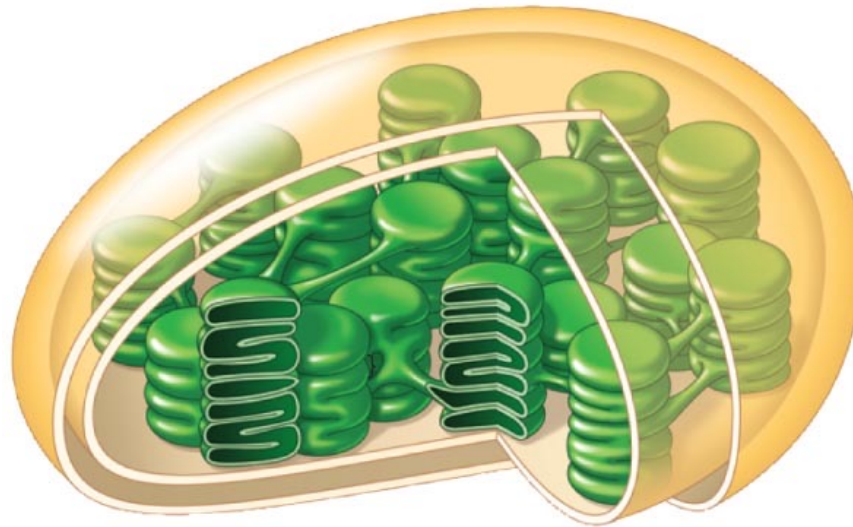
- **Joseph Priestley** (1774) – découvre l'O₂ et le fait que les plantes peuvent restaurer l'O₂.



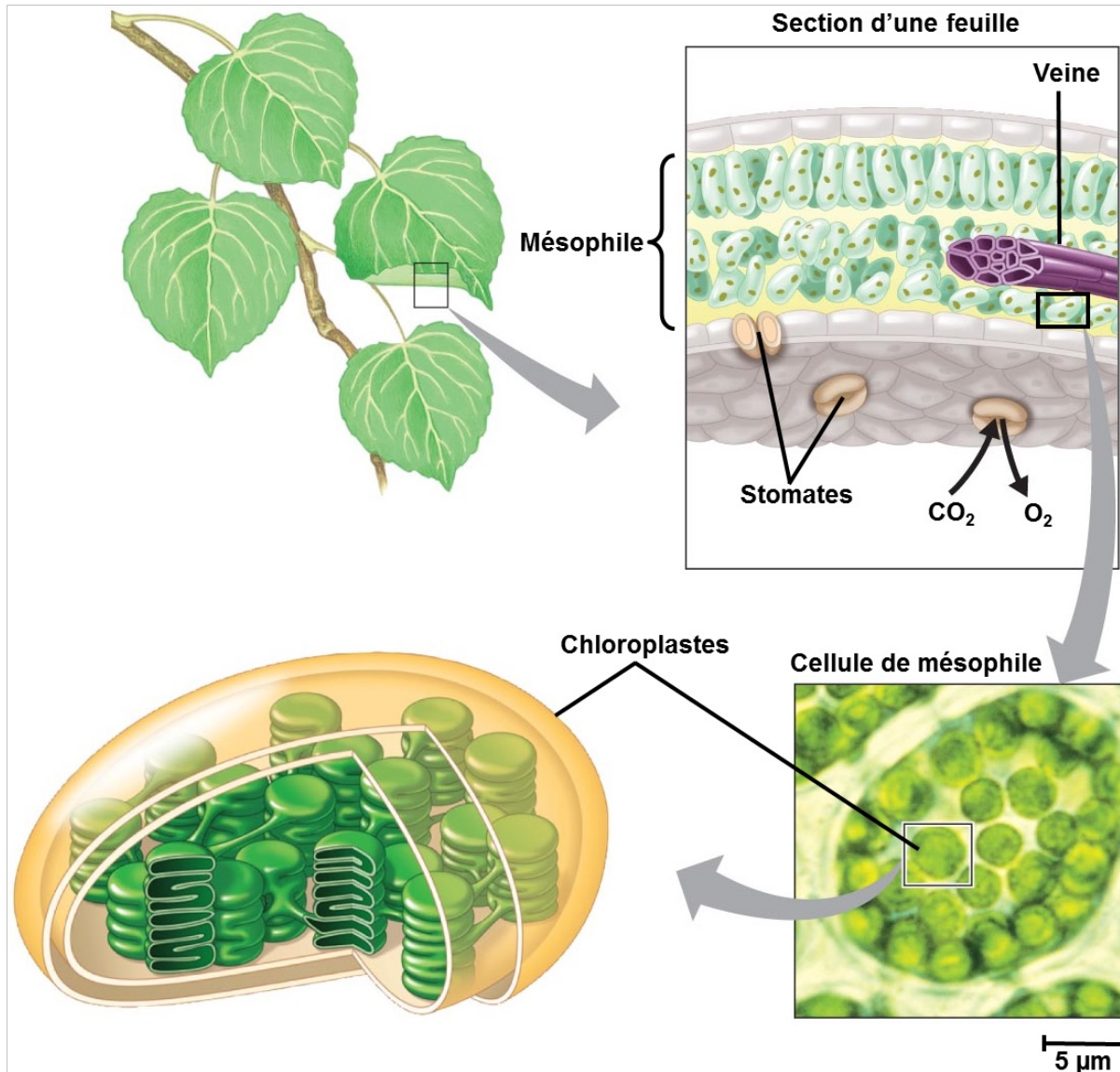
- **Jan Ingenhousz** (1779) – la lumière est essentielle pour que les plantes puissent restaurer l'O₂ → premier principe de la photosynthèse
 - **Jean Senebier** (1788) – le CO₂ présent dans l'air est fixé pendant ce processus → principe de la fixation du carbone.
 - **Theodore de Saussure** (1804) – H₂O est aussi essentielle pour la photosynthèse.
 - **Julius Mayer** (1842) – Premier énoncé de la photosynthèse, les plantes convertissent l'énergie solaire en énergie chimique.
-

Concept 10.1: La photosynthèse convertit l'énergie lumineuse en énergie chimique.

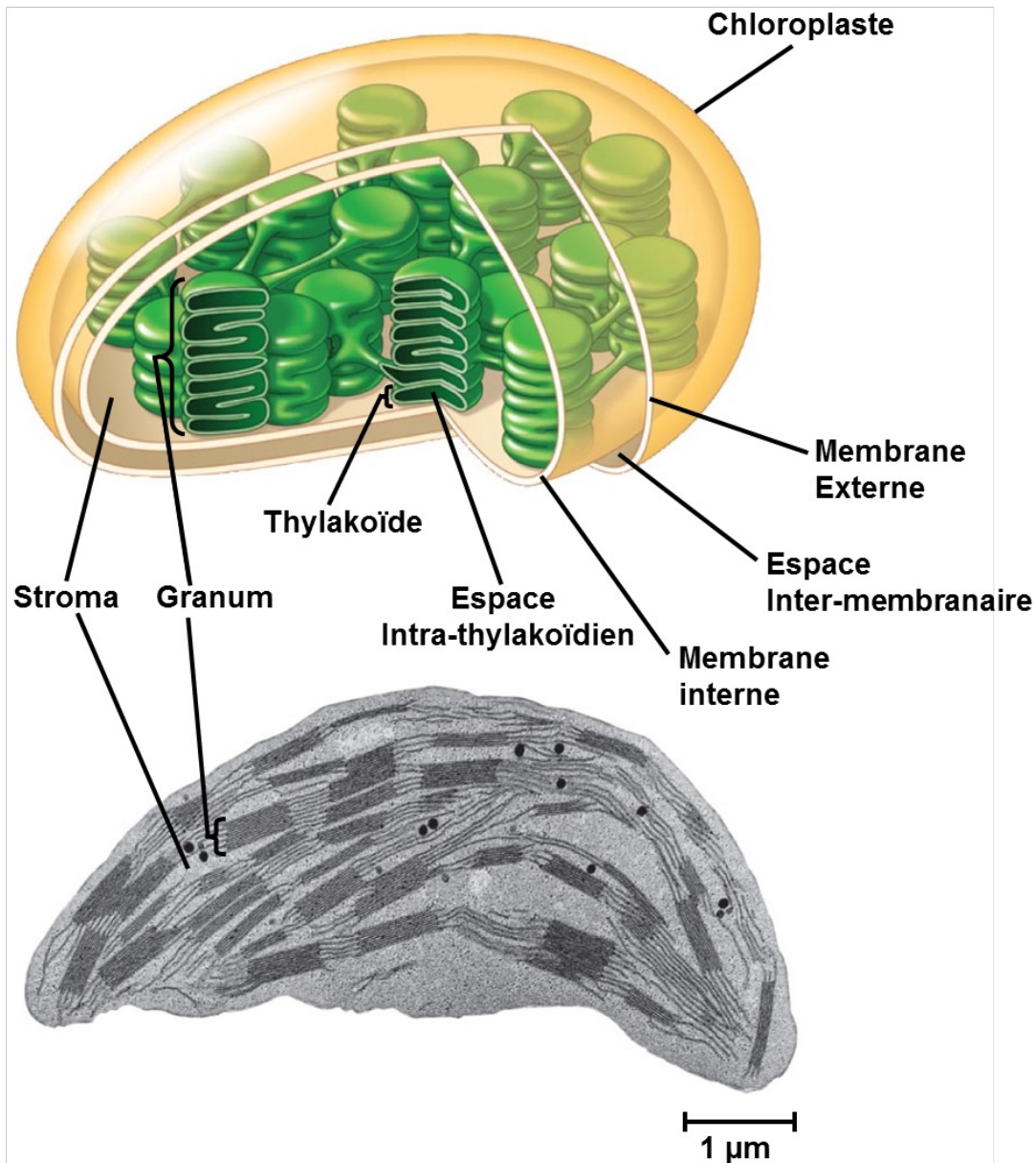
- Les chloroplastes sont structurellement très proches des bactéries photosynthétiques et dérivent probablement de ces bactéries → théorie de l'endosymbiose.
- Leur organisation structurale permet le déroulement des réactions chimiques de la photosynthèse → relation structure-fonction.



Les chloroplastes: sites de la photosynthèse chez les plantes



- Les feuilles sont les principaux sites de photosynthèse.
- Leur couleur verte provient de la **chlorophylle**, le pigment vert des chloroplastes.
- L'énergie lumineuse absorbée par la chlorophylle permet la synthèse de molécules organiques dans les chloroplastes.
- Le CO_2 entre et l' O_2 sort des feuilles par des pores microscopiques appelés **stomates**.

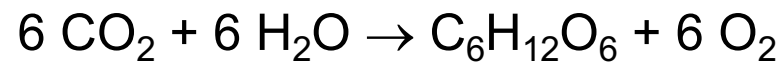


Copyright © 2008 Pearson Education, Inc., publishing as Pearson Benjamin Cummings.

- Les chloroplastes sont principalement localisés dans la partie interne de la feuille, un tissu appelé **mésophile**.
- Une cellule typique de mésophile contient entre 30 et 40 chloroplastes.
- La chlorophylle se trouve dans les membranes des **thylakoïdes** (sorte de sacs connectés entre eux dans les chloroplastes); les thylakoïdes peuvent être empilés en colonne que l'on appelle *grana*.
- Les chloroplastes contiennent également un fluide dense nommé **stroma**.

Le parcours des atomes pendant la photosynthèse: *recherche scientifique.*

- La photosynthèse se résume avec l'équation suivante:



Problème: $\Delta G' = + 2860 \text{ kJ.mol}^{-1} \dots$

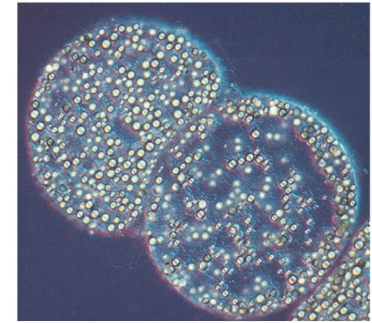
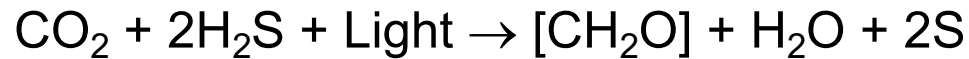
Le parcours des atomes pendant la photosynthèse: *recherche scientifique.*

- La photosynthèse se résume avec l'équation suivante:



La scission de la molécule de H_2O , et non celle de CO_2 , produit l' O_2

- Les chloroplastes casse la molécule d' H_2O en hydrogène et en oxygène, en incorporant les e^- de l'hydrogène dans les molécules de sucre.
- C.B van Niel – Stanford University (1930)

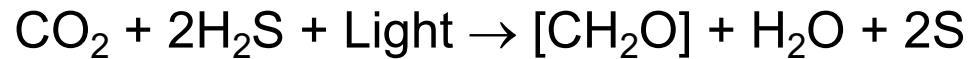


(e) Purple sulfur bacteria

1.5 μm

La scission de la molécule de H_2O , et non celle de CO_2 , produit l' O_2

- Les chloroplastes casse la molécule d' H_2O en hydrogène et en oxygène, en incorporant les e^- de l'hydrogène dans les molécules de sucre.
- C.B van Niel – Stanford University (1930)



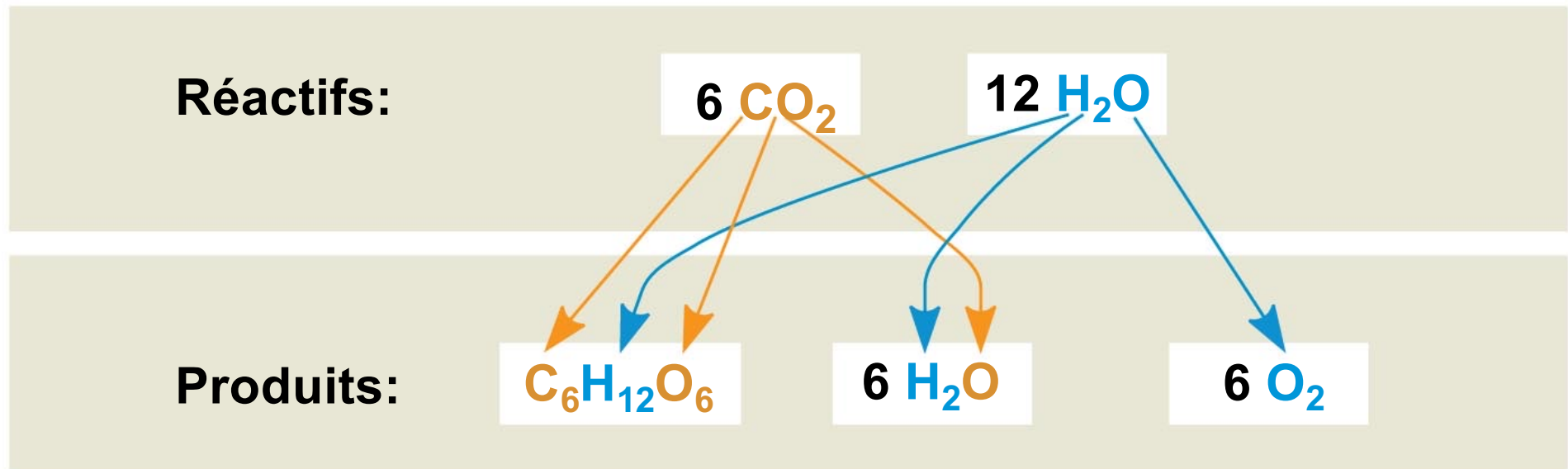
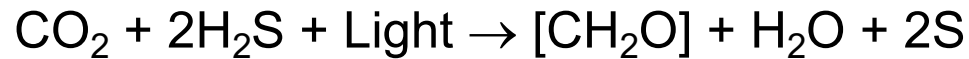
Bactérie sulfureuse: $CO_2 + 2H_2S + \text{Light} \rightarrow [CH_2O] + H_2O + 2S$

Plantes: $CO_2 + 2H_2O + \text{Light} \rightarrow [CH_2O] + H_2O + O_2$

En général: $CO_2 + 2H_2X + \text{Light} \rightarrow [CH_2O] + H_2O + 2X$

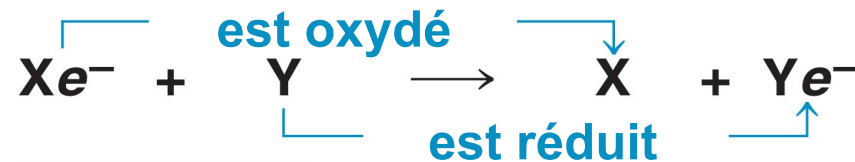
La scission de la molécule de H₂O, et non celle de CO₂, produit l'O₂

- Les chloroplastes casse la molécule d'H₂O en hydrogène et en oxygène, en incorporant les e⁻ de l'hydrogène dans les molécules de sucre.
- C.B van Niel – Stanford University (1930)



Les principes de l'oxydoréduction - RAPPEL

- Dans beaucoup de réactions chimiques, *un ou plusieurs électrons (e^-) passent d'un réactif à l'autre*. Ces transferts sont appelés **réactions d'oxydoréductions**, ou **réactions rédox**.
- La perte d'électrons correspond à l'**oxydation** (il y a un gain de charge positive)
- Le gain d'électrons correspond à la **réduction** (il y a perte ou réduction de charge positive)



Copyright © 2008 Pearson Education, Inc., publishing as Pearson Benjamin Cummings.

- Le donneur d'électrons (Xe^-) s'appelle **agent réducteur**,
→ il réduit Y
 - L'accepteur d'électrons (Y) s'appelle **agent oxydant**,
→ il oxyde Xe^-
-

La photosynthèse est une réaction Redox

- La photosynthèse n'est ni plus, ni moins qu'une réaction redox au cours de laquelle l' H_2O est oxydé et le CO_2 est réduit
 - C'est une réaction endergonique qui requiert donc de l'énergie – cette énergie provient de la lumière.
-

Les deux étapes de la photosynthèse: *Aperçu*

- La photosynthèse se déroule en deux étapes: les **réactions photochimiques** (*photo*) et le **cycle de Calvin** (*synthèse*)
 - Les **réactions photochimiques** (dans les *thylakoïdes*):
 - Cassent la molécule H_2O
 - Relâchent de l' O_2
 - Réduisent le **NADP⁺** en NADPH
 - Génèrent de l'ATP à partir de l'ADP par **photophosphorylation**
-

-
- Le **cycle de Calvin** (dans le *stroma*) forme des sucres à partir de CO_2 , en utilisant de l'ATP et du NADPH
 - Le cycle de Calvin commence avec la **fixation du carbone**, en incorporant le CO_2 atmosphérique dans des molécules organiques
-

Fig. 10-5-1

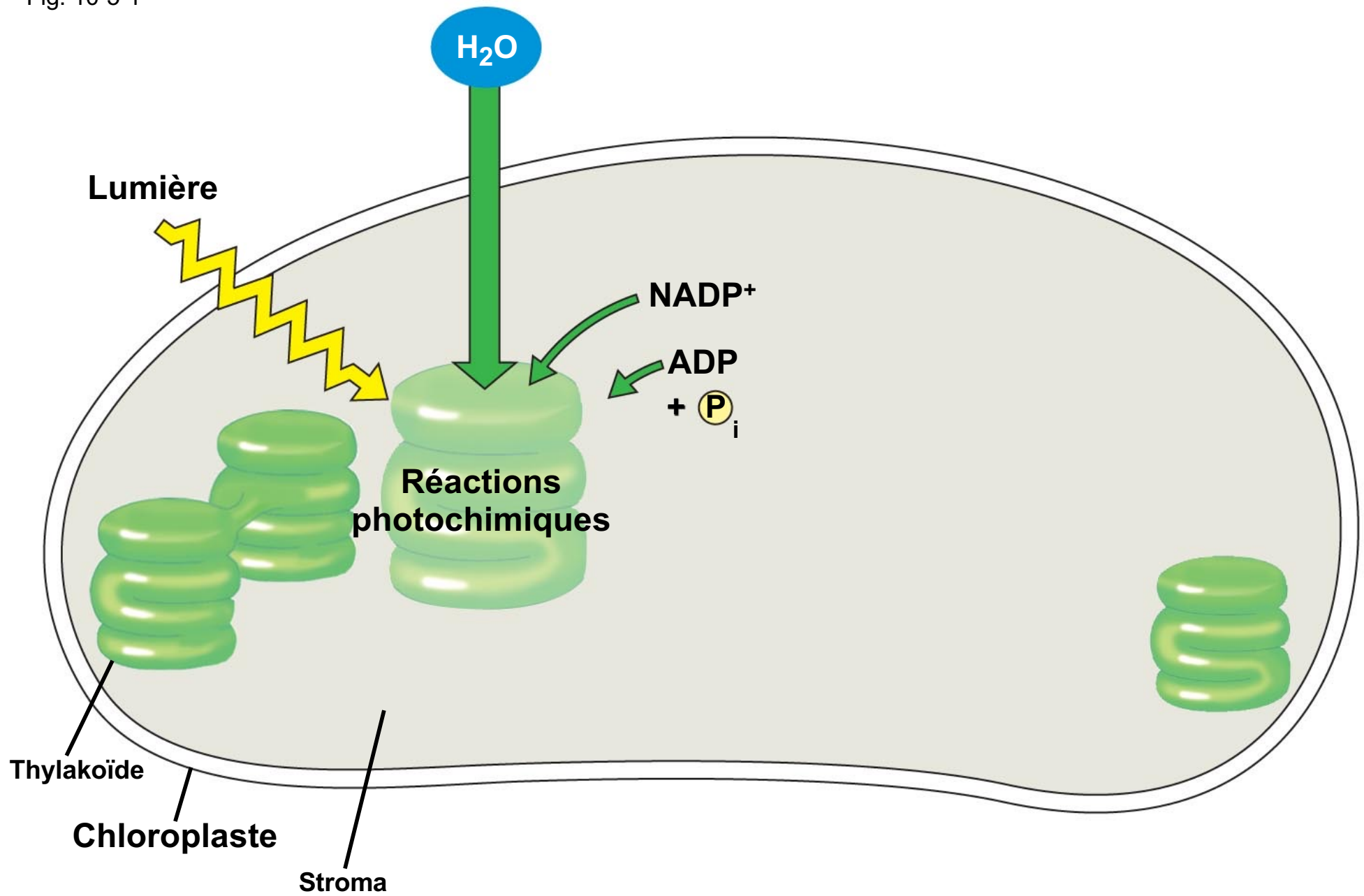


Fig. 10-5-2

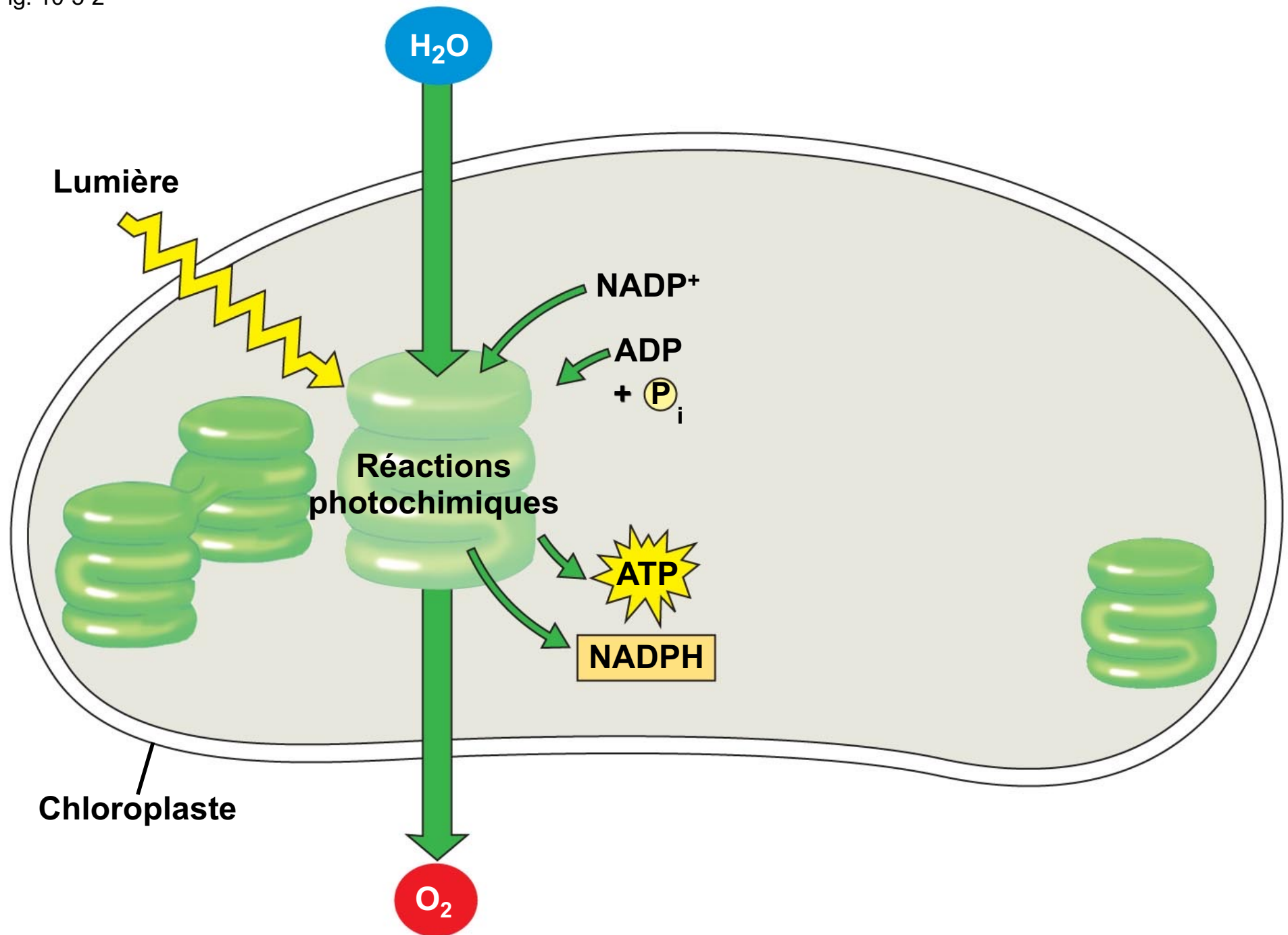


Fig. 10-5-3

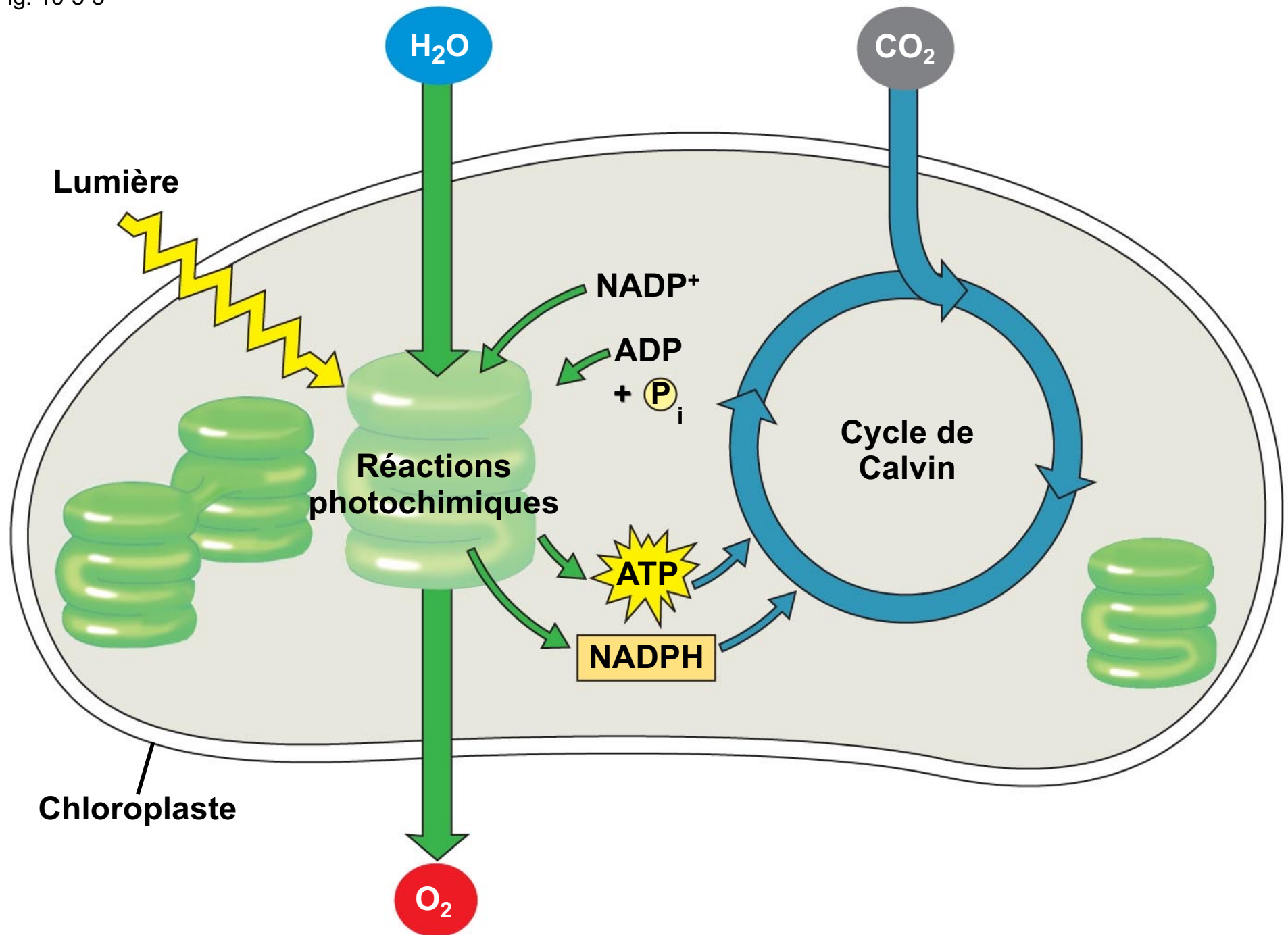
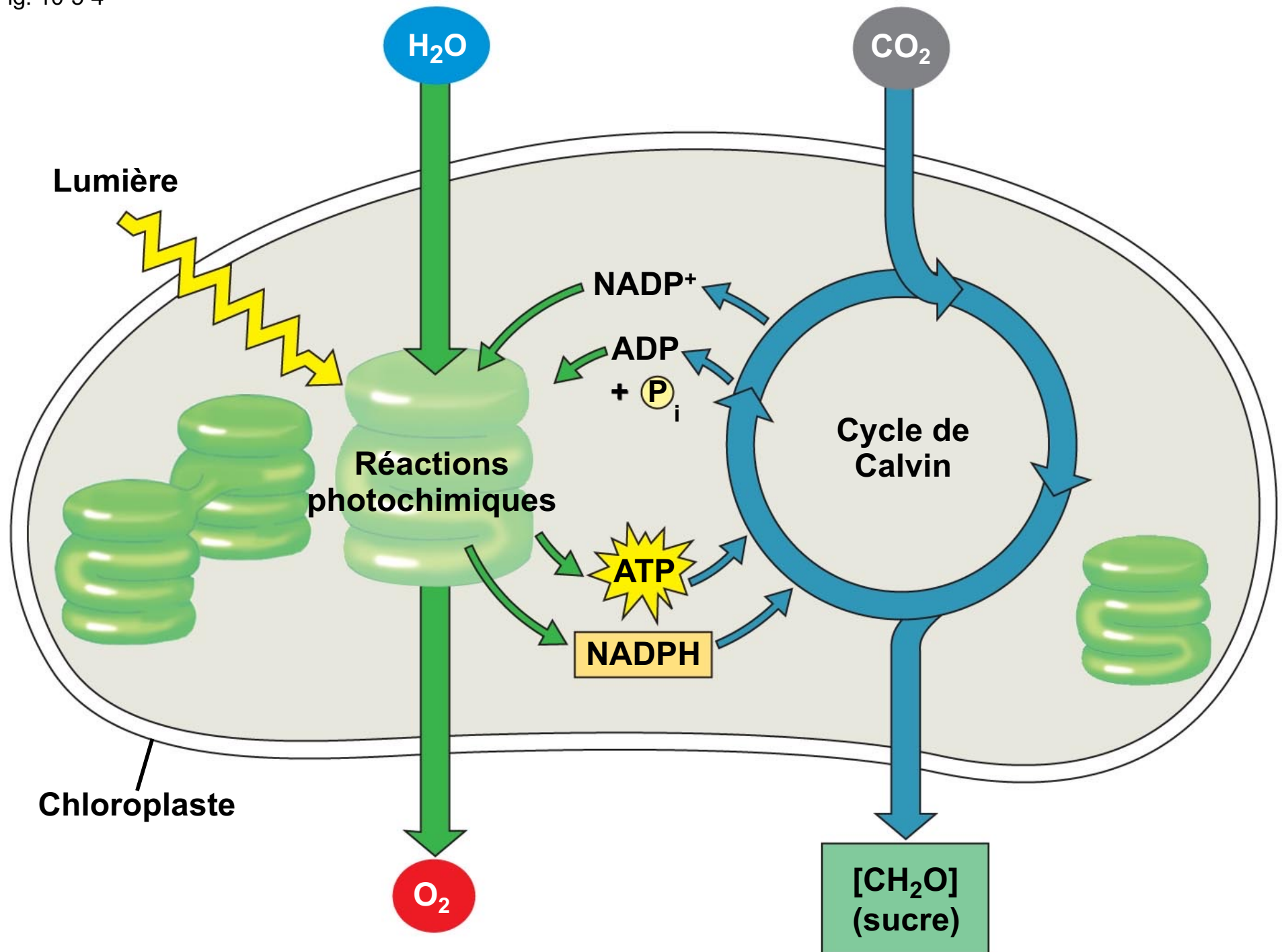


Fig. 10-5-4



Concept 10.2: L'énergie chimique de l'ATP et du NADPH + H^+ provient de l'énergie solaire transformée par les réactions photochimiques

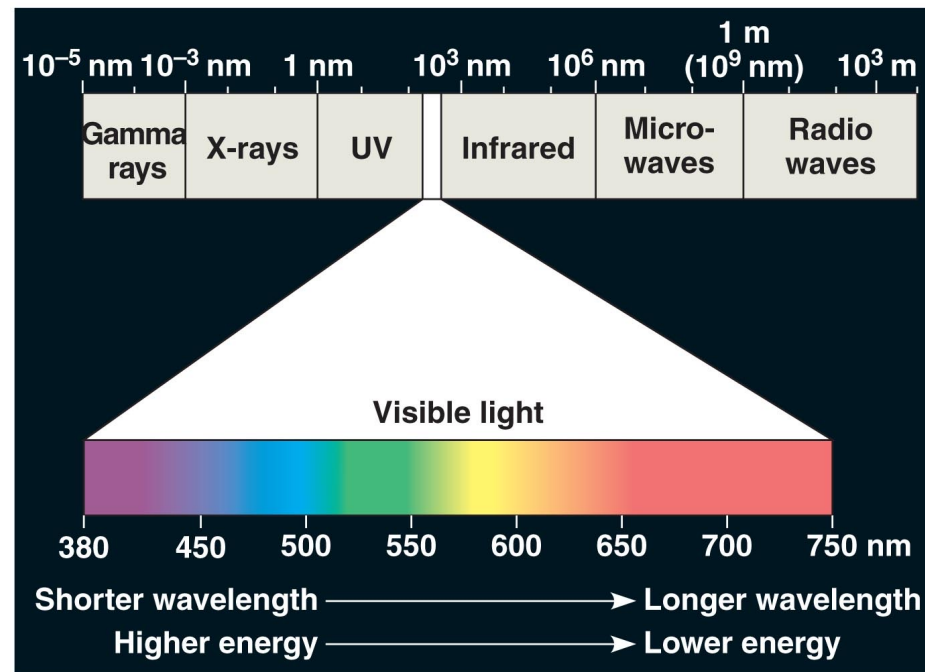
- Les chloroplastes sont des usines chimiques fonctionnant à l'énergie solaire
 - Dans les thylakoïdes, l'énergie lumineuse captée est transformée en énergie chimique: molécules d'ATP et de NADPH
-

La nature de la lumière solaire

- La lumière est une forme d'énergie appelée **énergie électromagnétique**, ou rayonnement électromagnétique
 - Cette énergie se propage en ondes rythmiques appelées **ondes électromagnétiques**.
 - La distance qui s'épare les crêtes de ces ondes correspond à la **longueur d'onde**.
 - La longueur d'onde détermine le type d'énergie électromagnétique.
-

Le spectre électromagnétique

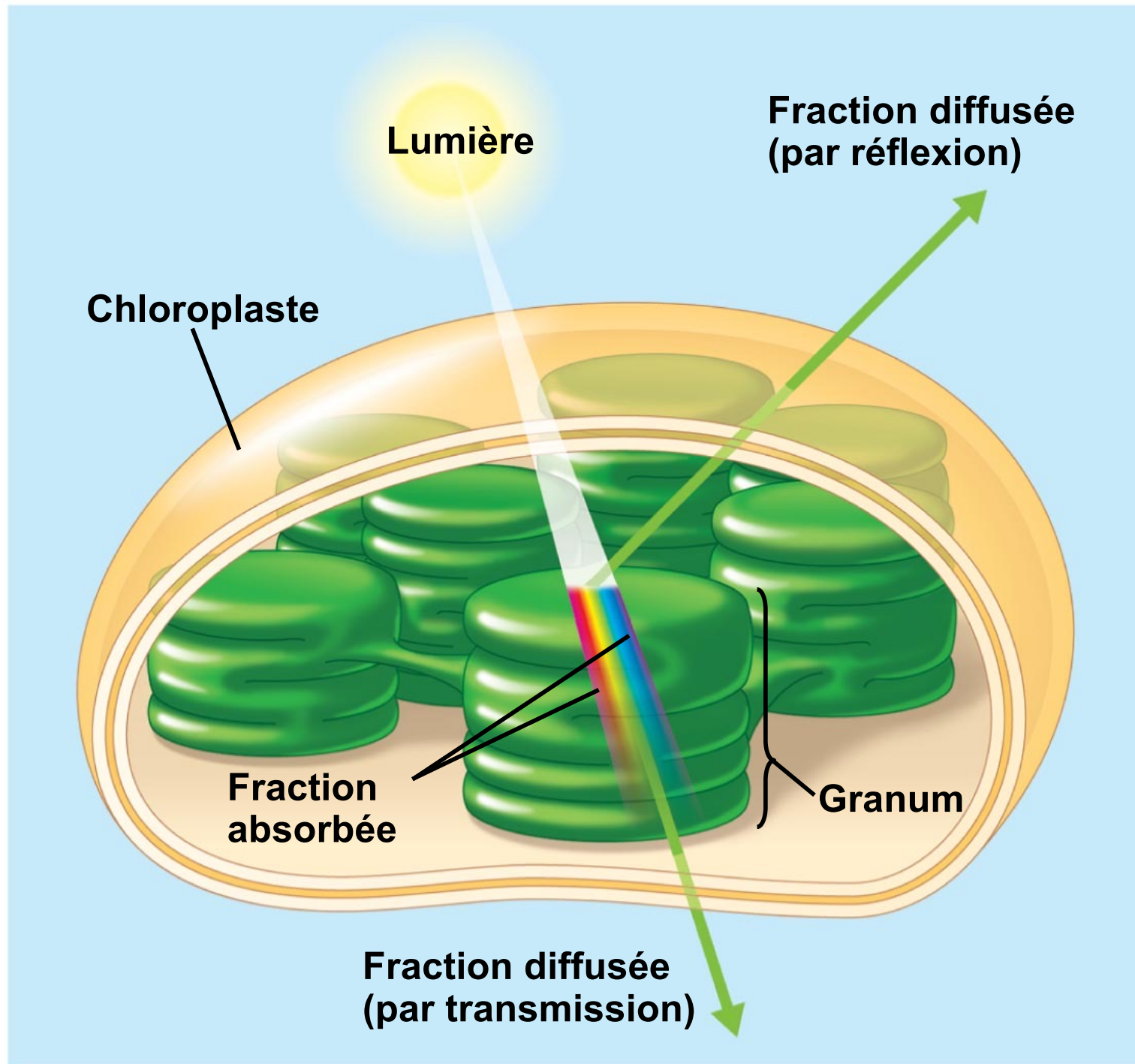
- La lumière blanche correspond à l'ensemble des longueurs d'onde comprises entre 380 et 750nm
- La lumière se comporte parfois comme une onde, parfois comme un flot de particules possédant de l'énergie. Ces particules sont appelées **photons**. Les photons ne sont pas des objets, mais se comportent comme des objets car ils possèdent une quantité déterminée d'énergie.



Les pigments photosynthétiques: des capteurs de lumière

- Lorsque la lumière rencontre la matière, celle-ci peut: (1) la diffuser (par réflexion); (2) la diffuser (par transmission); ou (3) l'absorber.
 - Les substances qui absorbent la lumière visible sont appelées **pigments**. Différents pigments absorbent différentes longueurs d'onde.
 - Les longueurs d'onde qui ne sont pas absorbées sont diffusées par réflexion ou par transmission.
 - Les feuilles apparaissent vertes car la chlorophylle absorbe la lumière rouge et la lumière bleue et diffuse la lumière verte.
-

Fig. 10-7



La détermination d'un spectre d'absorption

- Un **spectrophotomètre** mesure les proportions de lumière de différentes longueurs d'onde absorbées et diffusées par une solution de pigment.
 - Un **spectre d'absorption** est une représentation visuelle de la façon dont un pigment donné absorbe les différentes longueurs d'onde.
 - Le **spectre d'action** indique la vitesse de la photosynthèse par rapport à la longueur d'onde.
-

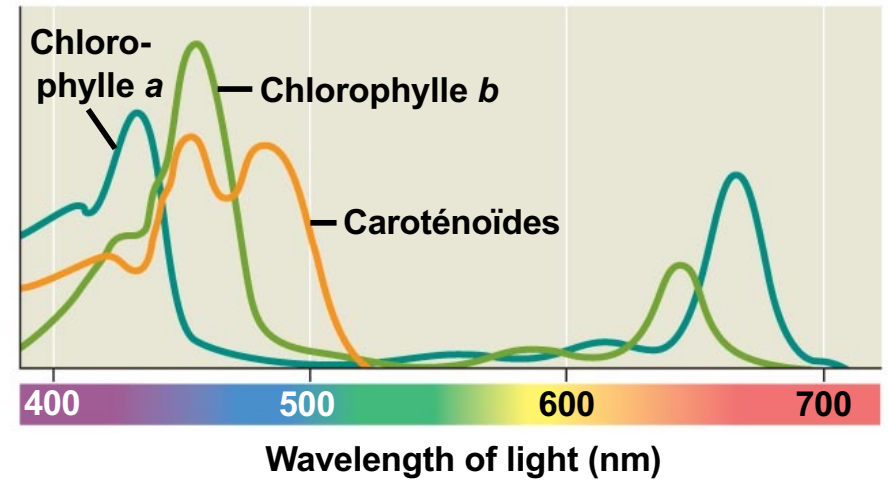
RESULTS

Theodore W. Engelmann
(1843-1901), a découvert les
longueurs d'onde les plus
favorables à la photosynthèse.



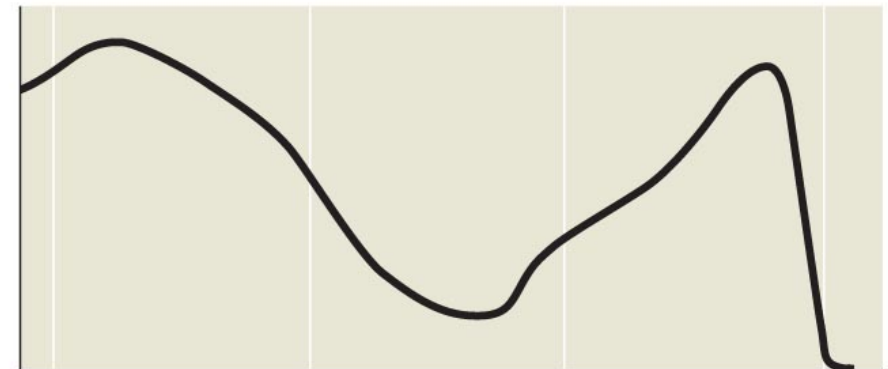
(a) Spectre d'absorption

Absorbance relative des
pigments des chloroplastes

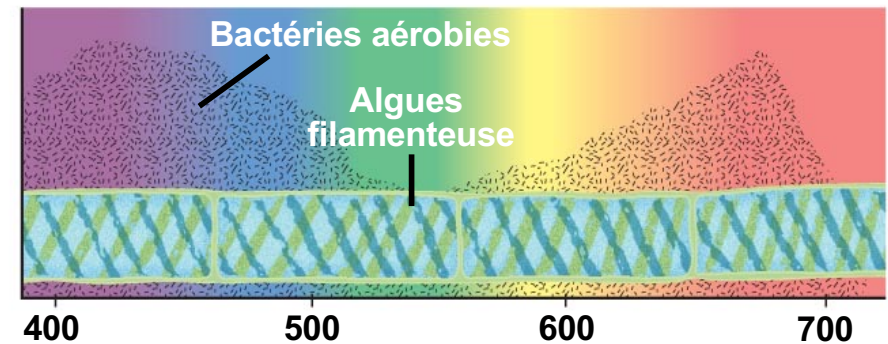


(b) Spectre d'action

Rendement de la photosynthèse
(mesurée par l'O₂ libéré)

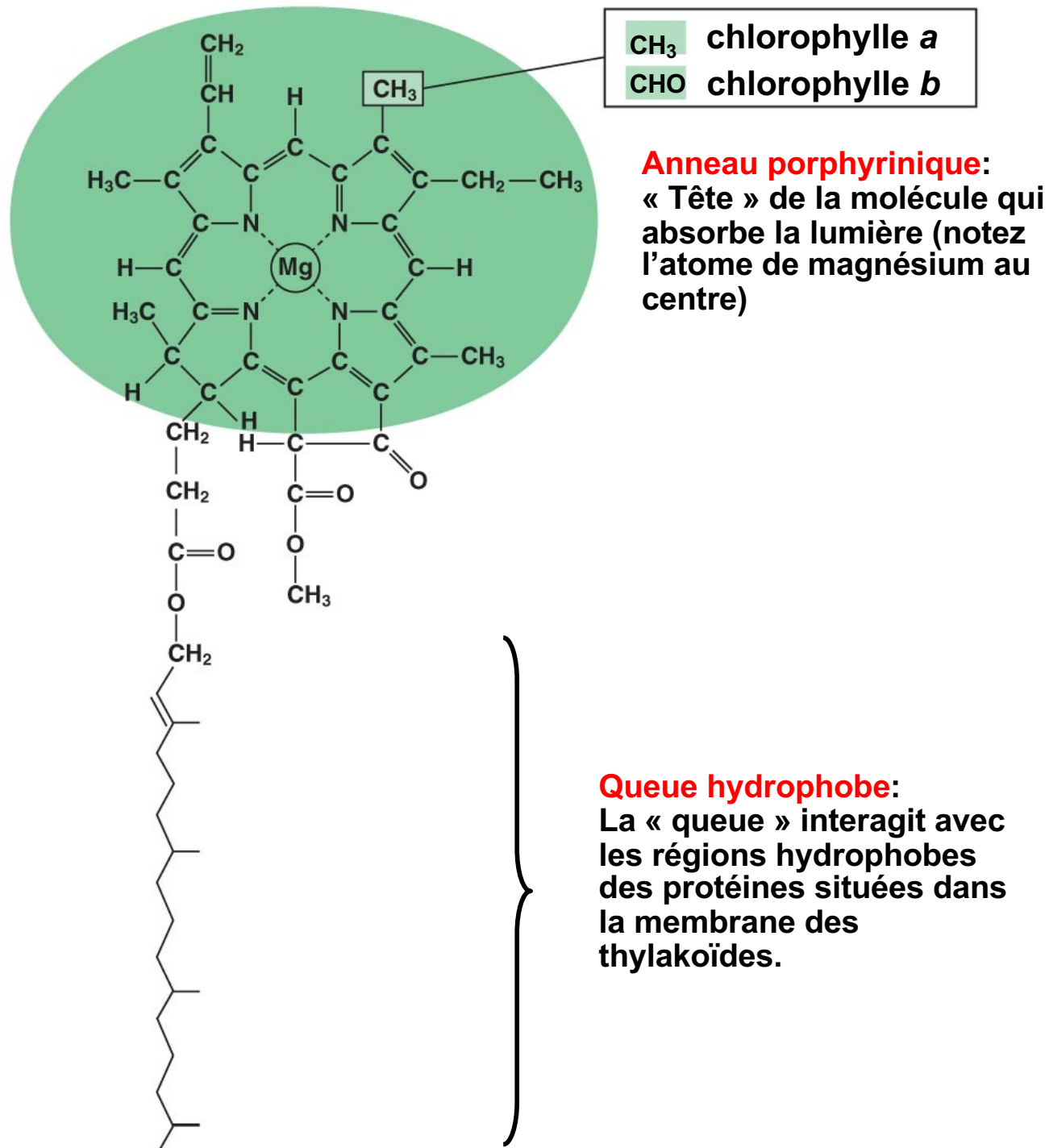


(c) Expérience d'
Engelmann



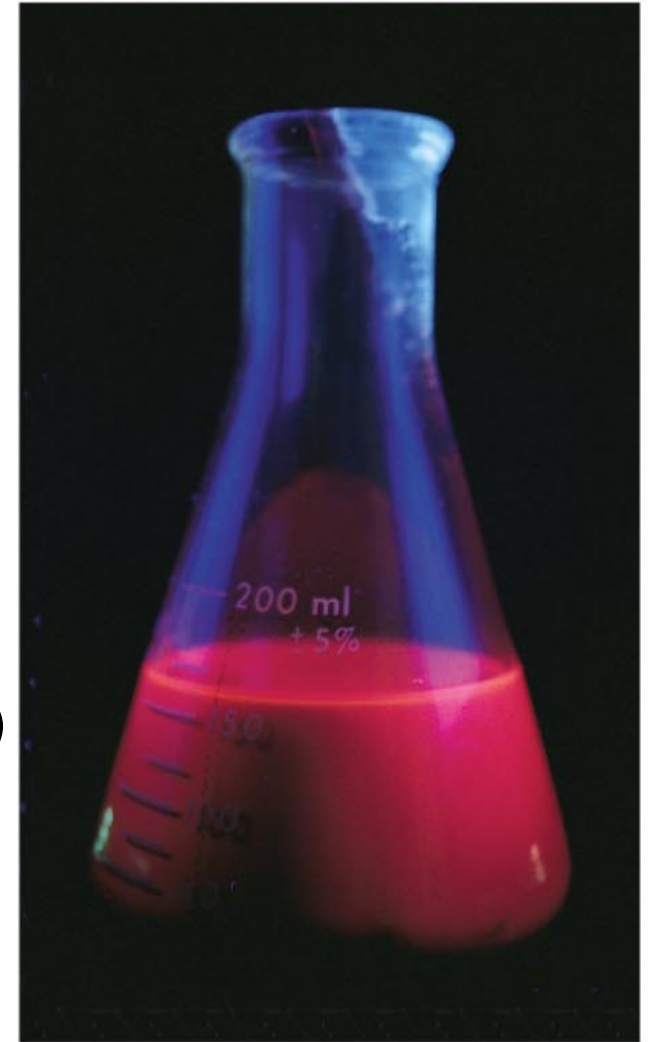
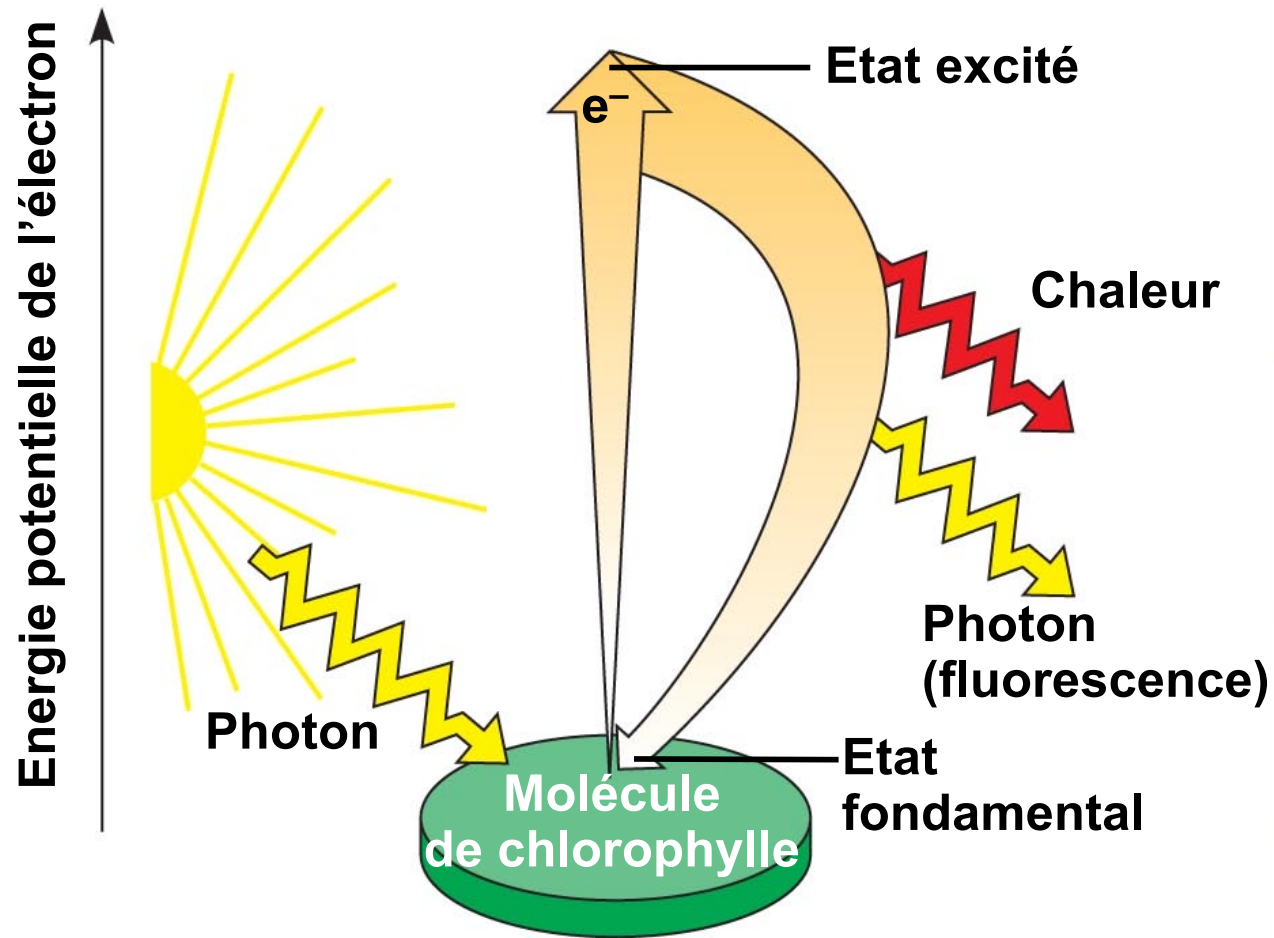
-
- La **Chlorophylle a** est le principal pigment photosynthétique.
 - D'autres pigments, dits accessoires, comme la **chlorophylle b**, servent à élargir le spectre d'action de la photosynthèse.
 - Certains pigments accessoires sont appelés **caroténoïdes**, ils absorbent l'excès de lumière qui pourrait endommager le chlorophylle – i.e. *photoprotection* (chez les plantes mais également dans nos yeux).
-

Fig. 10-10



La photooxydation de la chlorophylle

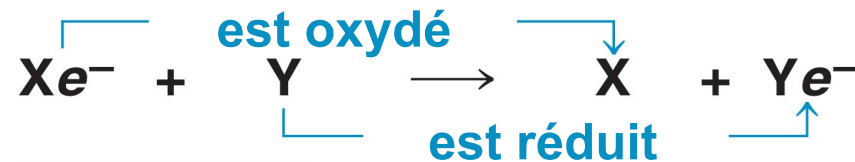
- Quand un pigment absorbe de la lumière, il passe d'un état fondamental à un état excité.
 - L'un de ses électrons (e^-) passe à une orbitale avec davantage d'énergie potentielle. Ce nouvel état est instable.
 - Quand les électrons excités reviennent à leur état fondamental, des photons (de moindre énergie) sont émis: la pigment fluoresce.
 - Lorsque l'on illumine une solution de chlorophylles isolées, celle-ci fluoresce et émet de la chaleur.
-



(a) Excitation d'une molécule de chlorophylle isolée (b) Fluorescence

Les principes de l'oxydoréduction - RAPPEL

- Dans beaucoup de réactions chimiques, *un ou plusieurs électrons (e^-) passent d'un réactif à l'autre*. Ces transferts sont appelés **réactions d'oxydoréductions**, ou **réactions rédox**.
- La perte d'électrons correspond à l'**oxydation** (il y a un gain de charge positive)
- Le gain d'électrons correspond à la **réduction** (il y a perte ou réduction de charge positive)



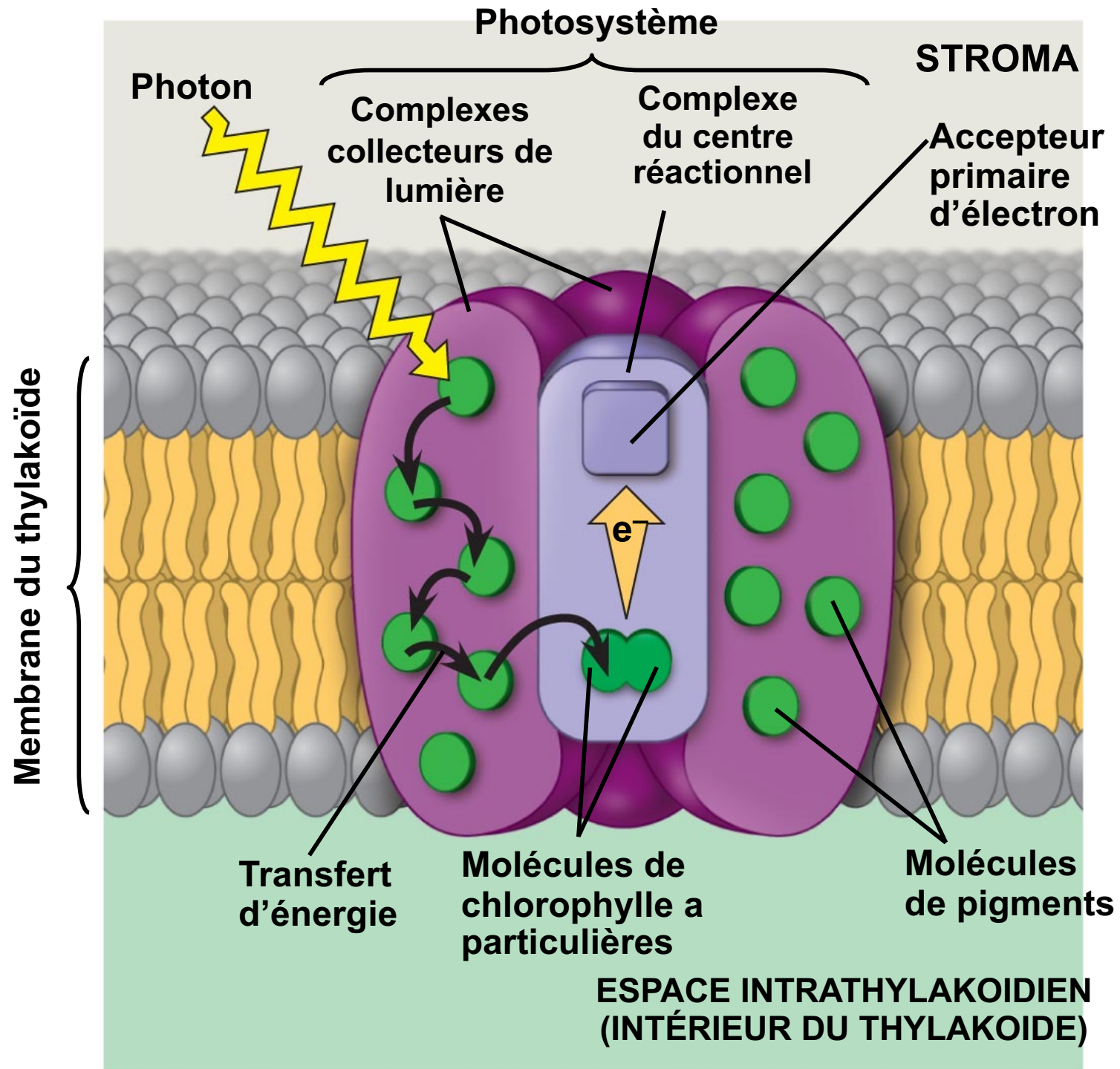
Copyright © 2008 Pearson Education, Inc., publishing as Pearson Benjamin Cummings.

- Le donneur d'électrons (Xe^-) s'appelle **agent réducteur**,
→ il réduit Y
 - L'accepteur d'électrons (Y) s'appelle **agent oxydant**,
→ il oxyde Xe^-
-

Le photosystème: un complexe du centre réactionnel associé à des complexes moléculaires collecteurs de lumière.

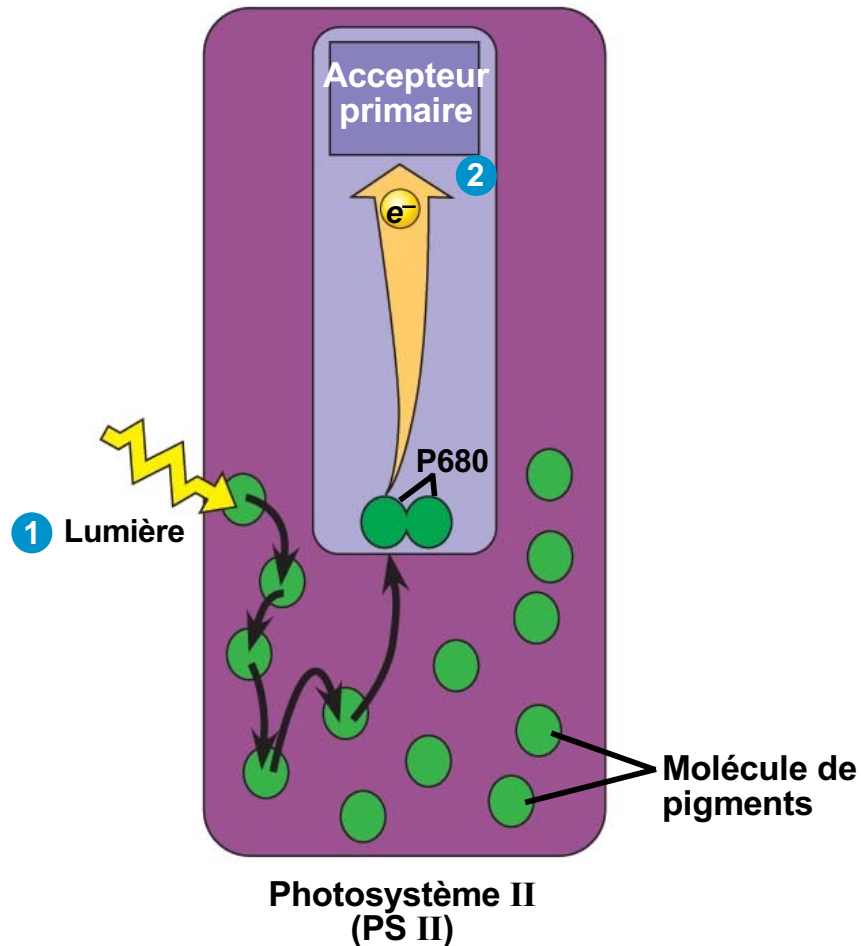
- Un photosystème se compose d'un **complexe du centre réactionnel** entouré d'un certain nombre de complexes collecteurs de lumière.
 - Les **complexes collecteurs de lumière** réunissent diverses molécules de pigment qui se comportent comme des antennes collectrices d'énergie pour le **complexe du centre réactionnel**.
 - Le complexe du centre réactionnel possède une molécule particulière: **l'accepteur primaire d'électron** qui peut accepter des électrons et être réduit (il s'agit d'une molécule de chlorophylle a sans atome de magnésium).
-

Fig. 10-12



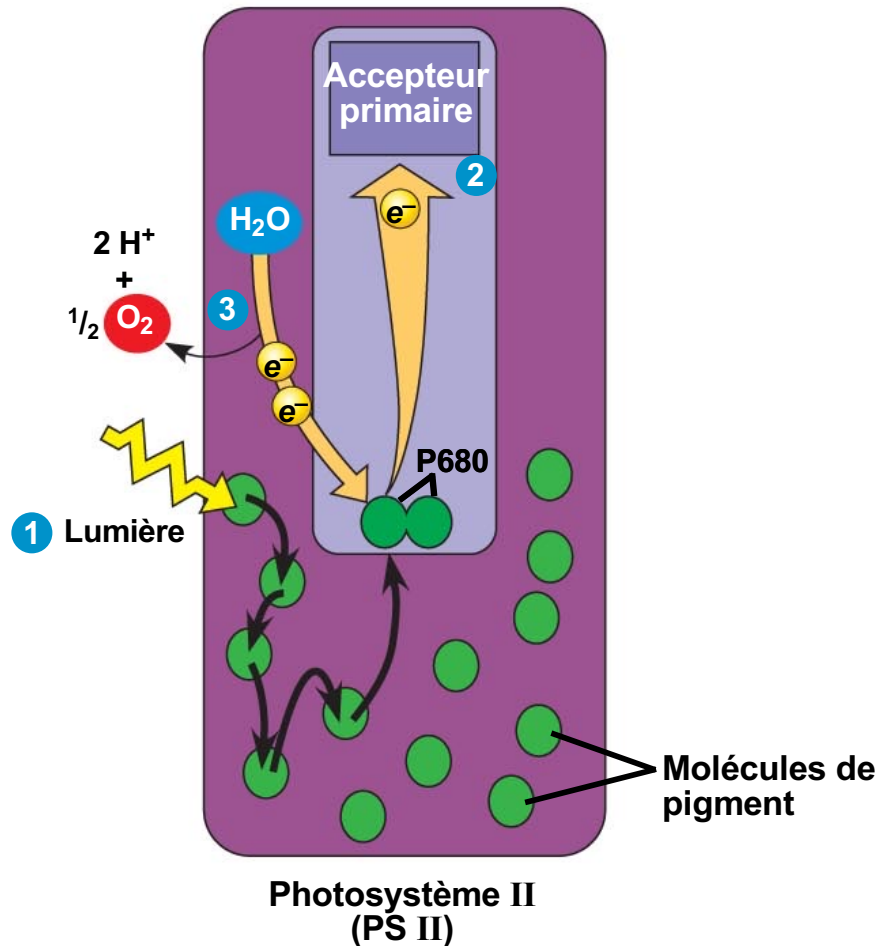
-
- Il existe deux types de photosystème dans la membrane du thylakoïde.
 - **Le photosystème II (PS II)** fonctionne en premier (mais a été découvert en deuxième). Il absorbe le mieux la longueur d'onde de 680 nm. La *chlorophylle a* de son centre réactionnel est appelée **P680**.
 - **Le photosystème I (PS I)** absorbe le mieux la longueur d'onde de 700 nm. La *chlorophylle a* de son centre réactionnel est appelée **P700**.
-

Fig. 10-13-1



- Un photon frappe une molécule de pigment et son énergie est transférée entre différentes molécules de pigment jusqu'à ce que cette énergie excite une P680.
- Un électron excité de P680 est transféré à l'accepteur primaire d'électron → **réaction d'oxydoréduction**

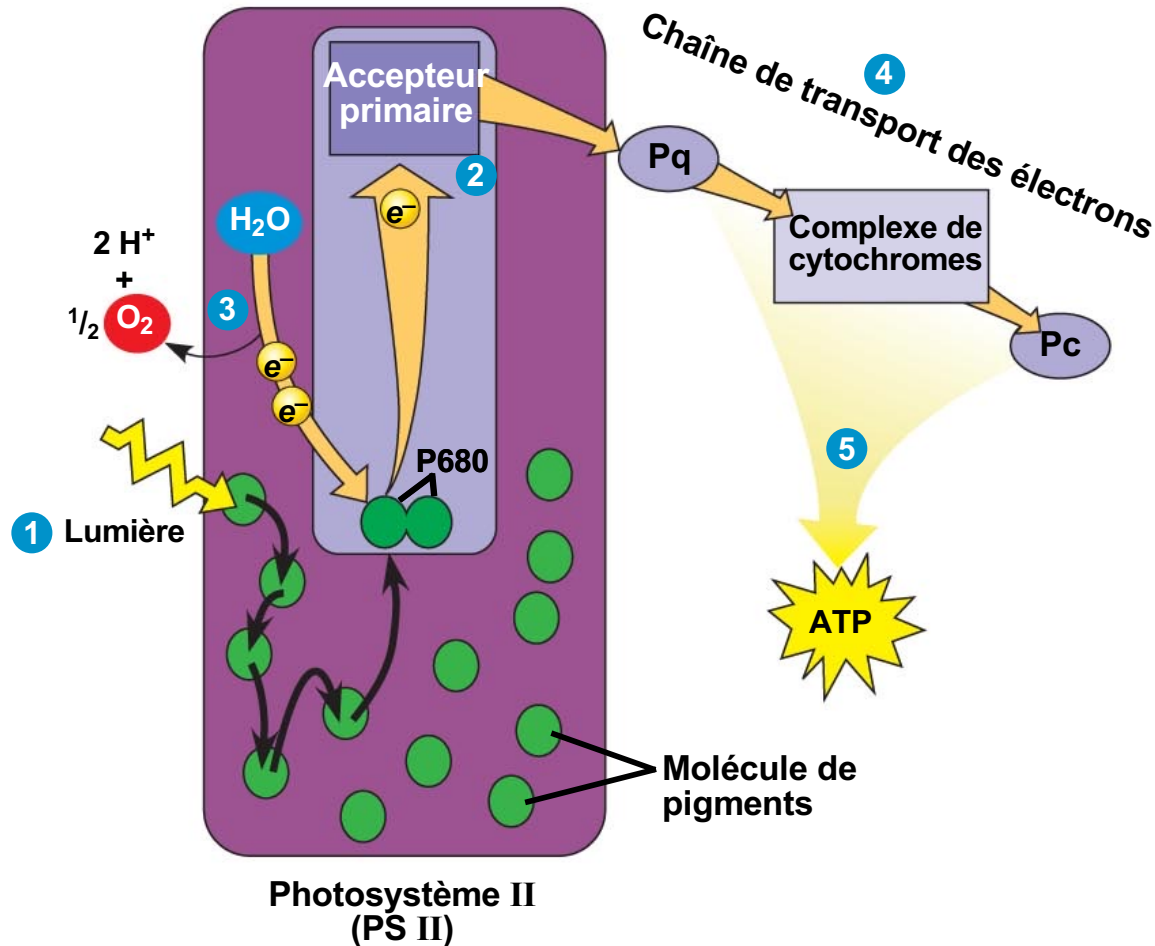
Fig. 10-13-2



Copyright © 2008 Pearson Education, Inc., publishing as Pearson Benjamin Cummings.

- $P680^+$ ($P680$ manquant un électron) est un agent oxydant très fort (l'agent oxydant le plus puissant dans la nature). $P680^+$ est un excellent accepteur d'électrons.
- H_2O est oxydé pendant la photosynthèse. H_2O est cassé par des enzymes qui transfèrent les électrons des atomes d'hydrogène vers $P680^+$, qui est donc réduit en $P680$.
- De l' O_2 est produit.
- Les H^+ (protons) sont relâchés dans l'espace intrathylakoidien

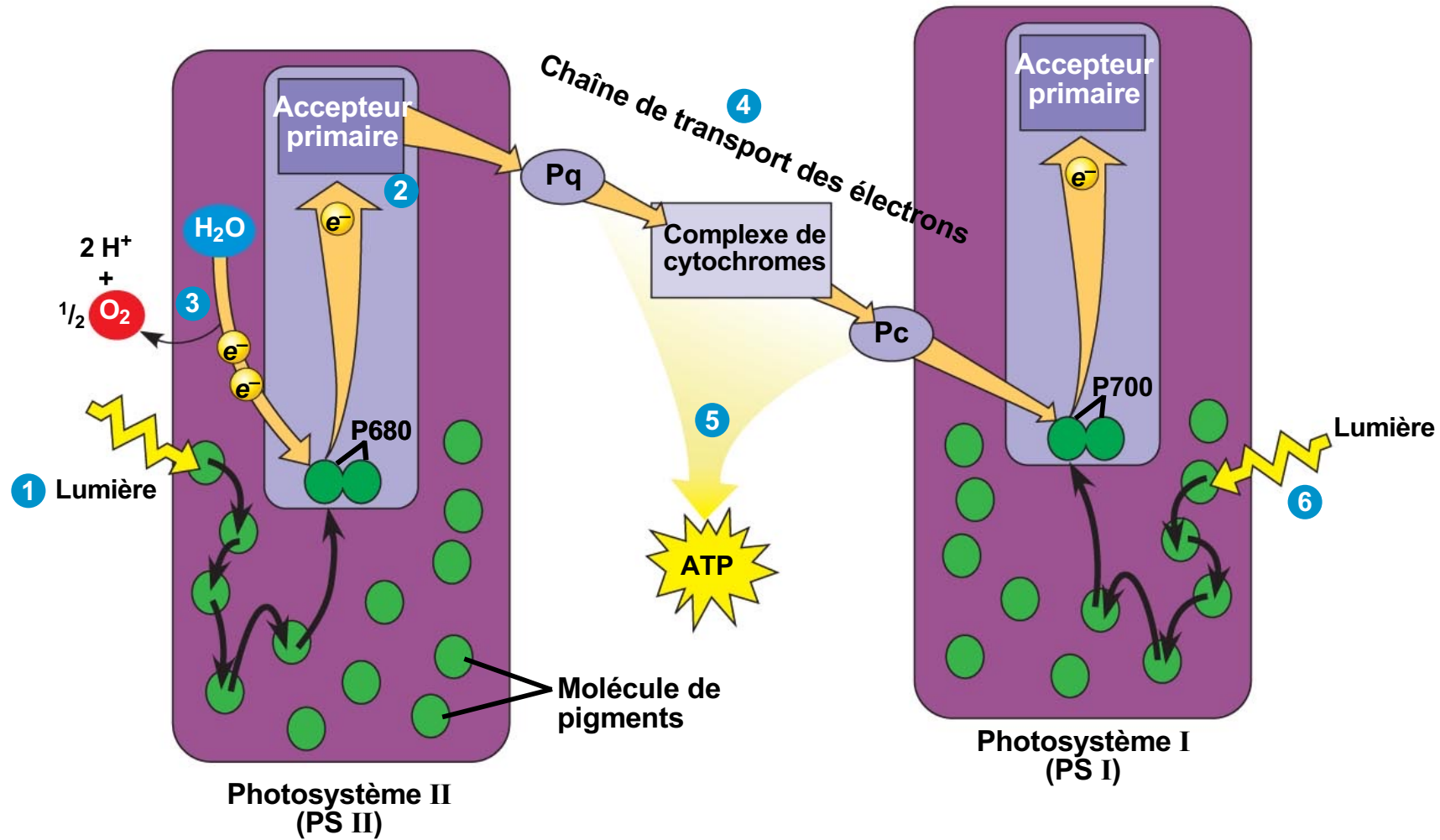
Fig. 10-13-3



Copyright © 2008 Pearson Education, Inc., publishing as Pearson Benjamin Cummings.

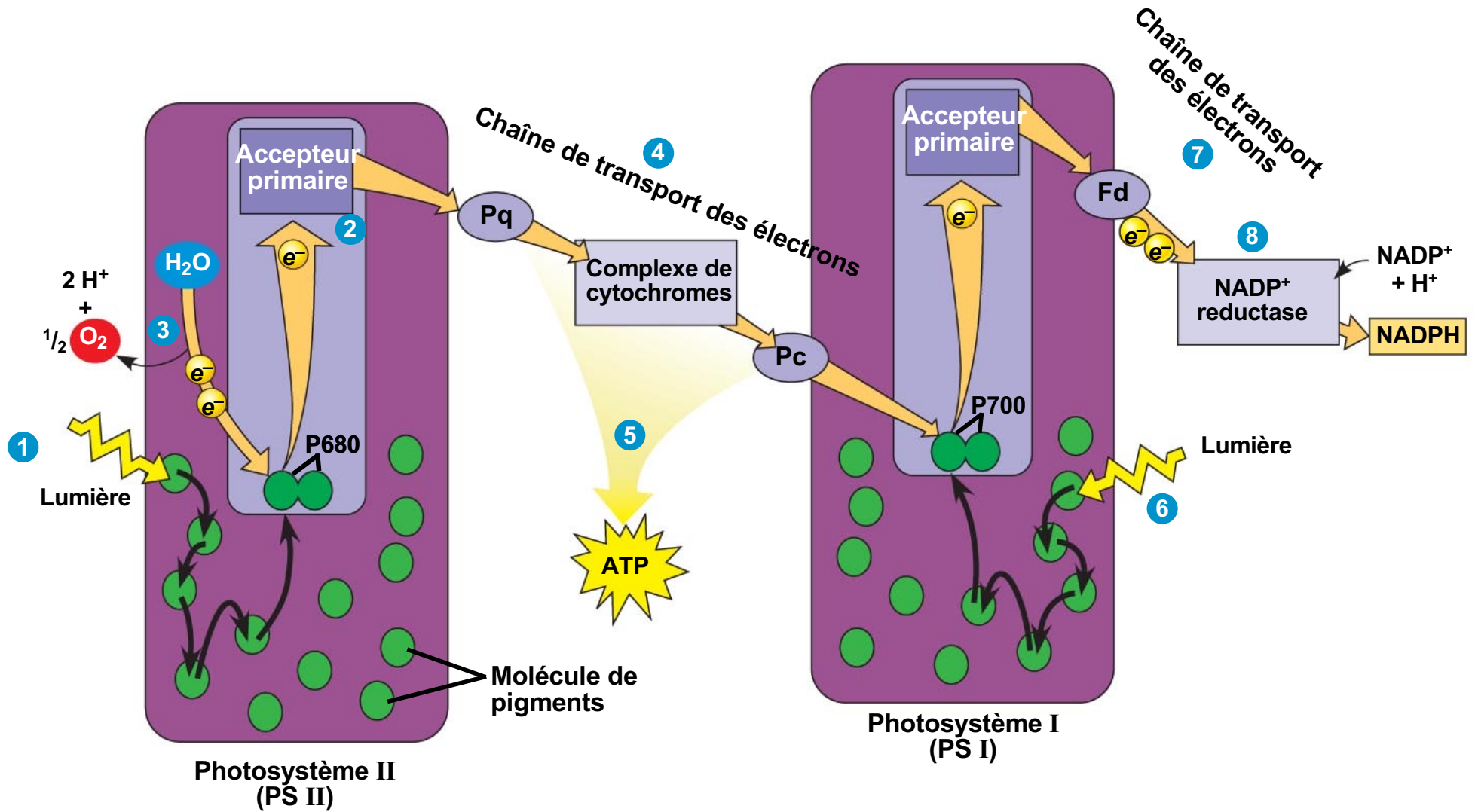
- Les électrons excités par la lumière passent de l'accepteur primaire d'électron du PSII une chaîne de transport des électrons (très similaire à celle des mitochondries).
- En dévalant la chaîne de transport des électrons vers un niveau d'énergie plus bas, des H^+ sont pompés dans l'espace intrathylakoidien. Ces H^+ serviront lors de la **chimiosmose**
- La diffusion des H^+ à travers la membrane du thylakoïde sert à générer de l'ATP (la **photophosphorylation**)

Fig. 10-13-4



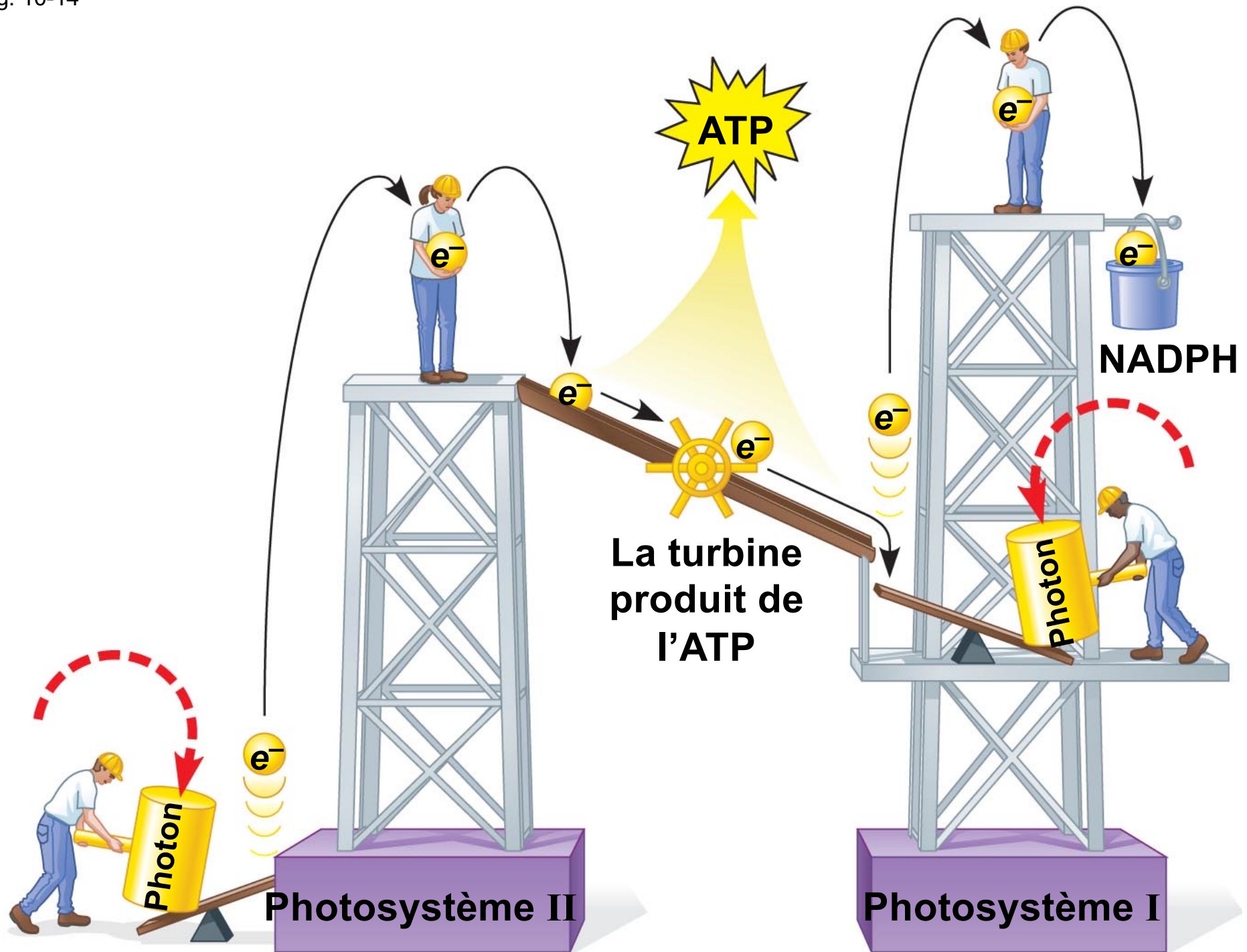
-
- Dans le PSI (comme dans le PS II), un photon frappe une molécule de pigment et son énergie est transférée entre différentes molécules de pigment jusqu'à ce que cette énergie excite une P700.
 - Un électron excité de P700 est transféré à l'accepteur primaire d'électron du PSI.
 - $P700^+$ (P700 manquant désormais un électron) peut accepter l'électron provenant du PSII au travers de la chaîne de transport des électrons.
-

Fig. 10-13-5

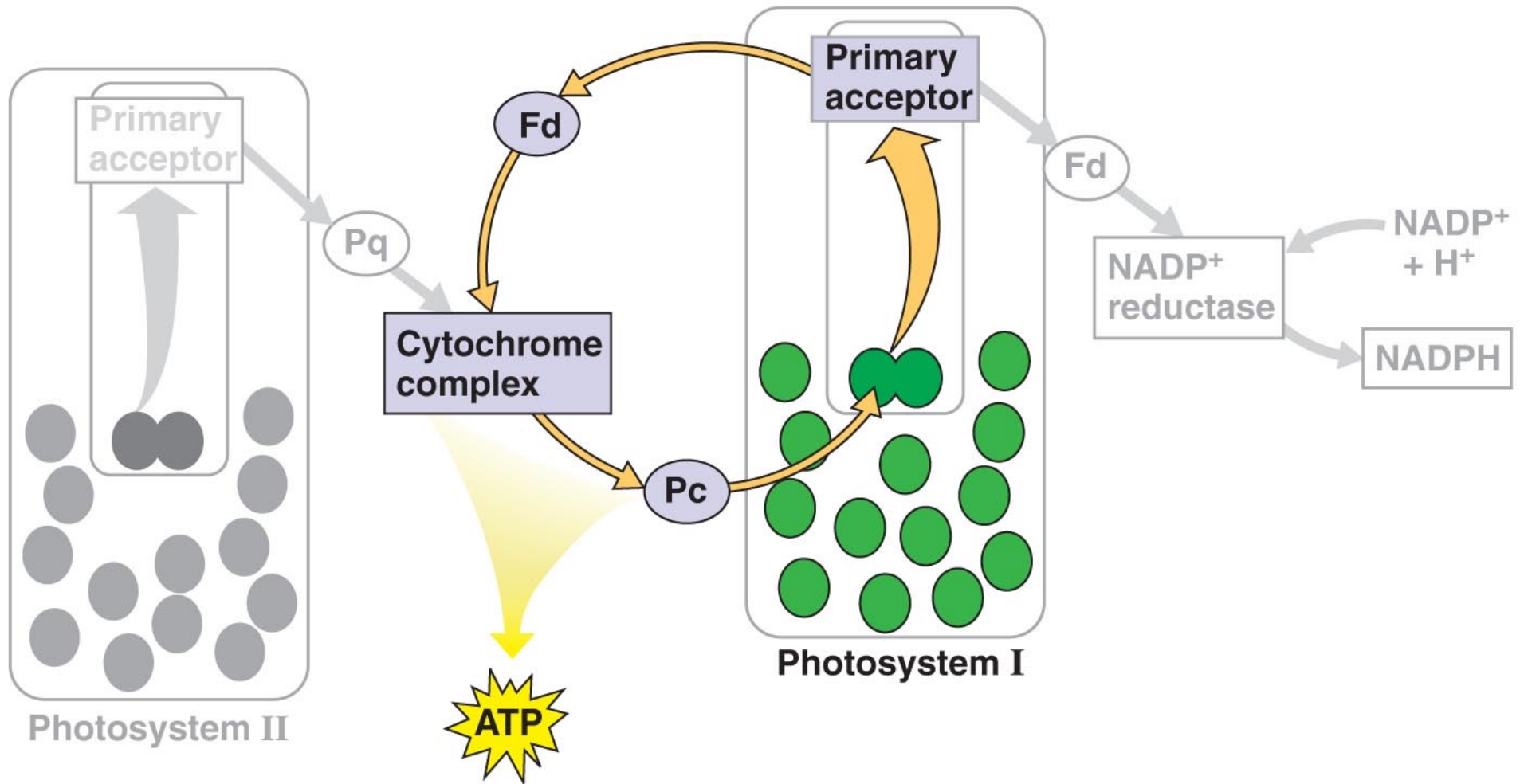


-
- Les électrons dévalent ensuite une seconde chaîne de transport d'électrons depuis l'accepteur primaire d'électrons du PSI vers la protéine ferrédoxine (Fd).
 - Cette seconde chaîne de transport d'électron ne génère pas de gradient de protons et ne contribue donc PAS à la synthèse d'ATP.
 - Les électrons sont en fait transférés au NADP^+ qui est réduit en NADPH.
 - Les électrons captés dans le NADPH sont désormais disponibles pour le cycle de Calvin.
-

Fig. 10-14



Le transport cyclique des électrons



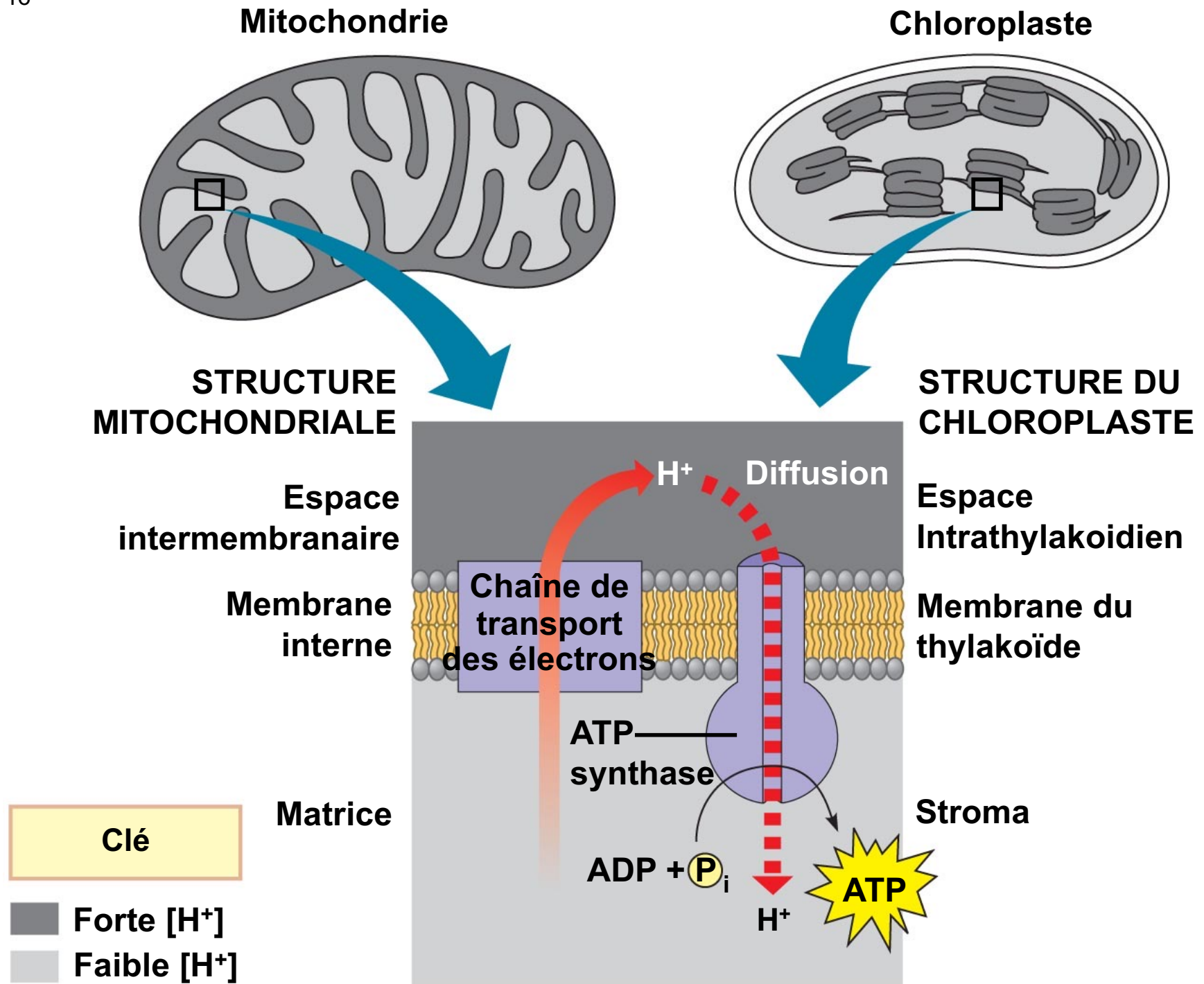
Le transport cyclique des électrons

- Le transport cyclique des électrons utilise uniquement le PSI.
 - Certaines bactéries ne possèdent que le PSI et le transport cyclique des électrons est leur seul moyen de synthétiser de l'ATP.
 - Le transport cyclique des électrons peut aussi être utilisé par des espèces possédant le PSI et le PSII.
 - Pendant le transport cyclique des électrons il n'y a pas de production de NADPH ni de dégagement d'O₂.
 - Les plantes mutantes pour le transport cyclique des électrons poussent très bien en faible lumière mais dépérissent avec une lumière intense → rôle photoprotecteur du transport cyclique des électrons.
-

Comparaison de la chimiosmose dans le chloroplastes et le mitochondries

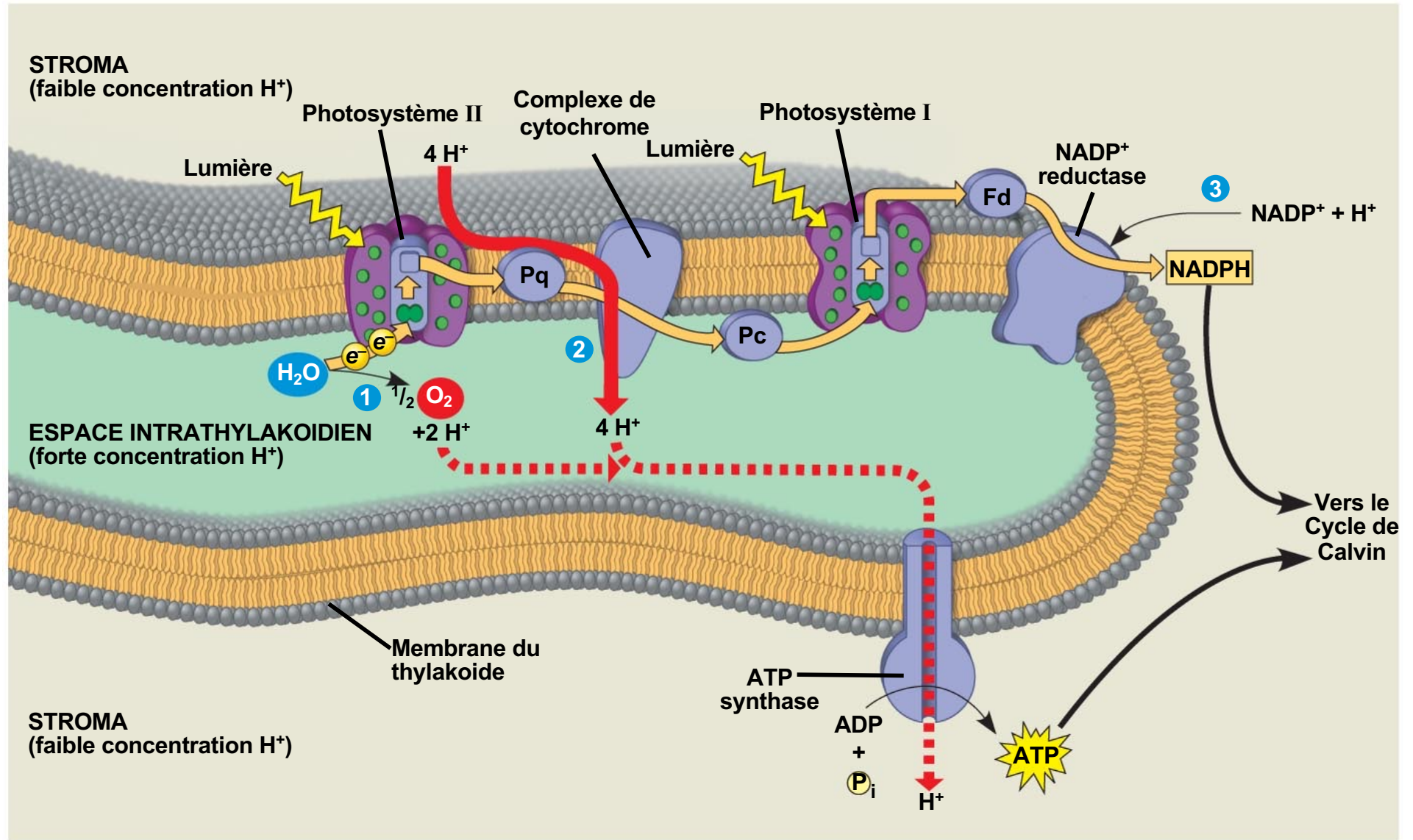
- Chloroplastes et mitochondries génèrent de l'ATP par chimiosmose, mais utilisent des sources d'énergie différentes.
 - Les *mitochondries* transforment l'énergie chimique des nutriments en énergie chimique de l'ATP; les *chloroplastes* transforment l'énergie lumineuse en énergie chimique de l'ATP.
 - Il existe des similitudes et des différences dans l'organisation spatiale des mitochondries et des chloroplastes.
-

Fig. 10-16



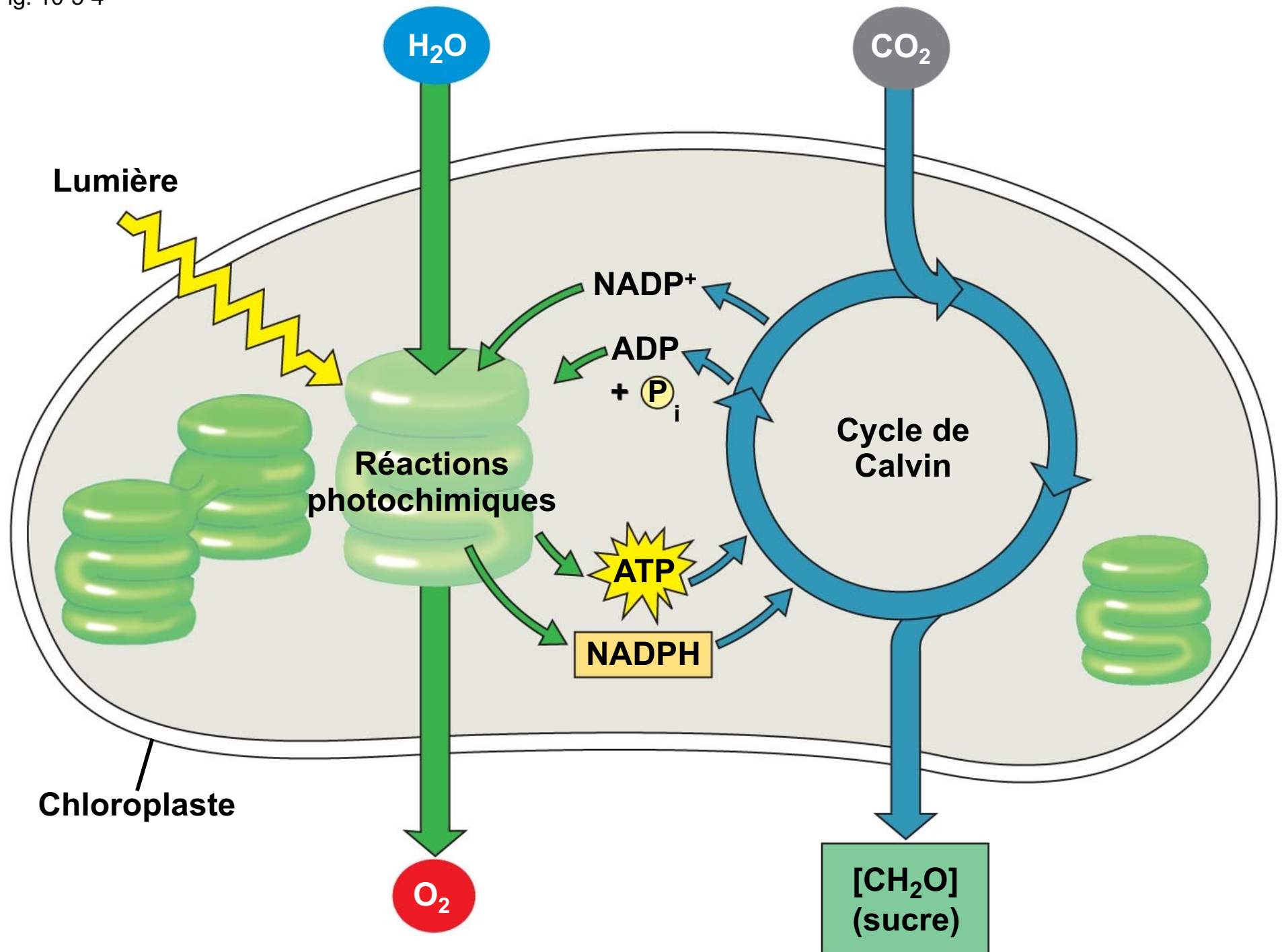
-
- Dans les **mitochondries**, les protons sont transportés dans *l'espace intermembranaire* et participent à la synthèse d'ATP lorsqu'ils retournent dans la *matrice mitochondriale*.
 - Dans les **chloroplastes**, les protons sont transportés dans *l'espace intrathylakoidien* et participent à la synthèse d'ATP lorsqu'ils retournent dans le *stroma*.

Fig. 10-17



-
- L'ATP et le NADPH sont produits dans le stroma où a lieu le cycle de Calvin.
 - En résumé, l'énergie lumineuse génère de l'ATP et augmente l'énergie potentielle des électrons en les déplaçant de l'H₂O vers le NADPH.
-

Fig. 10-5-4



Concept 10.3: Le cycle de Calvin utilise l'énergie chimique de l'ATP et du NADPH pour convertir le CO₂ en sucre

- Le cycle de Calvin, comme le cycle de l'acide citrique, régénère une molécule initiale après qu'un réactif soit entré et qu'un produit en soit sorti.
- Le cycle de Calvin génère des glucides à partir de molécules plus petites en utilisant l'énergie de l'ATP et le pouvoir réducteur du NADPH.
- Le cycle de Calvin est **anabolique** (le cycle de l'acide citrique est majoritairement **catabolique**).

Melvin Calvin (1911-1997), découvre la fixation du carbone dans les années 1940s. Il reçoit le prix Nobel de chimie en 1961



-
- Le carbone entre dans le cycle sous forme de CO_2 et en ressort comme molécule de glucide, le **glyceraldehyde-3-phosphate (G3P)**, aussi nommé **3-phosphoglycéraldehyde (PGAL)**.
 - Pour une synthèse nette de 1 G3P, le cycle doit tourner trois fois et fixer 3 molécules de CO_2 .
 - Le cycle de Calvin peut se décomposer en trois étapes:
 - **La fixation du carbone** (catalysée par une enzyme, la **rubisco**)
 - **Réduction**
 - **Régénération de l'accepteur du CO_2 (RuBP)**
-

Fig. 10-18-1

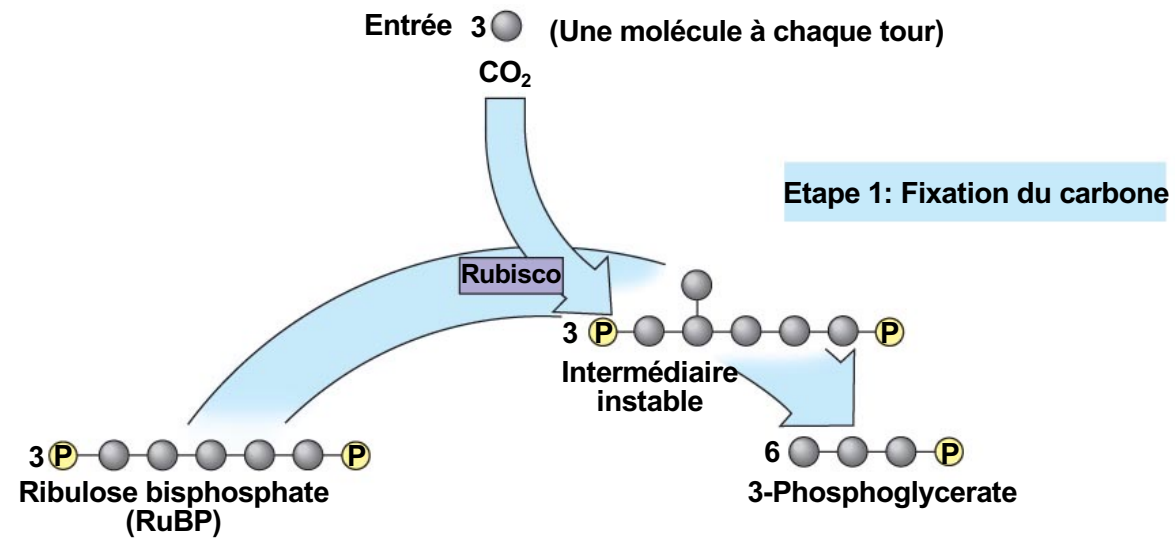


Fig. 10-18-2

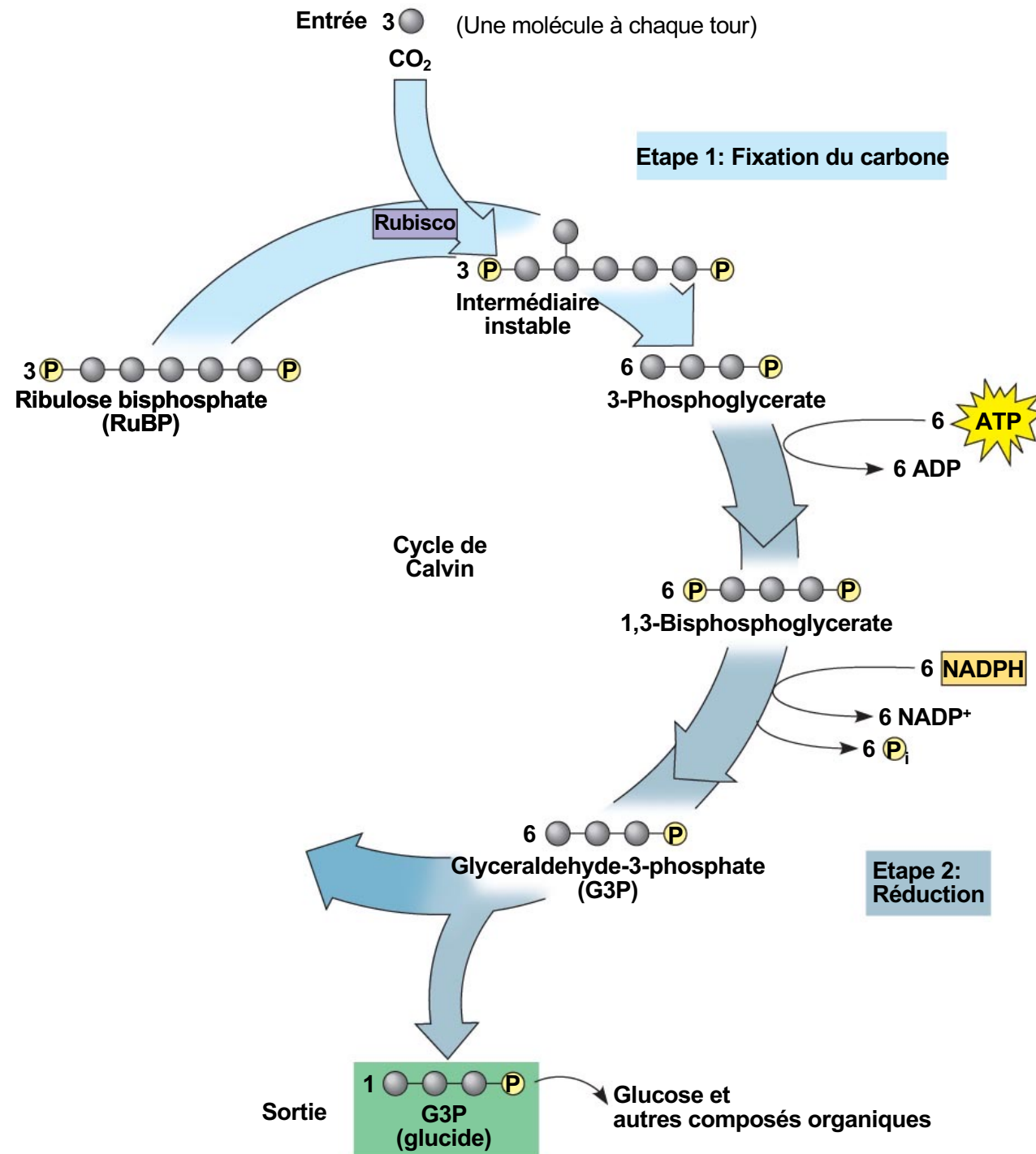


Fig. 10-18-3

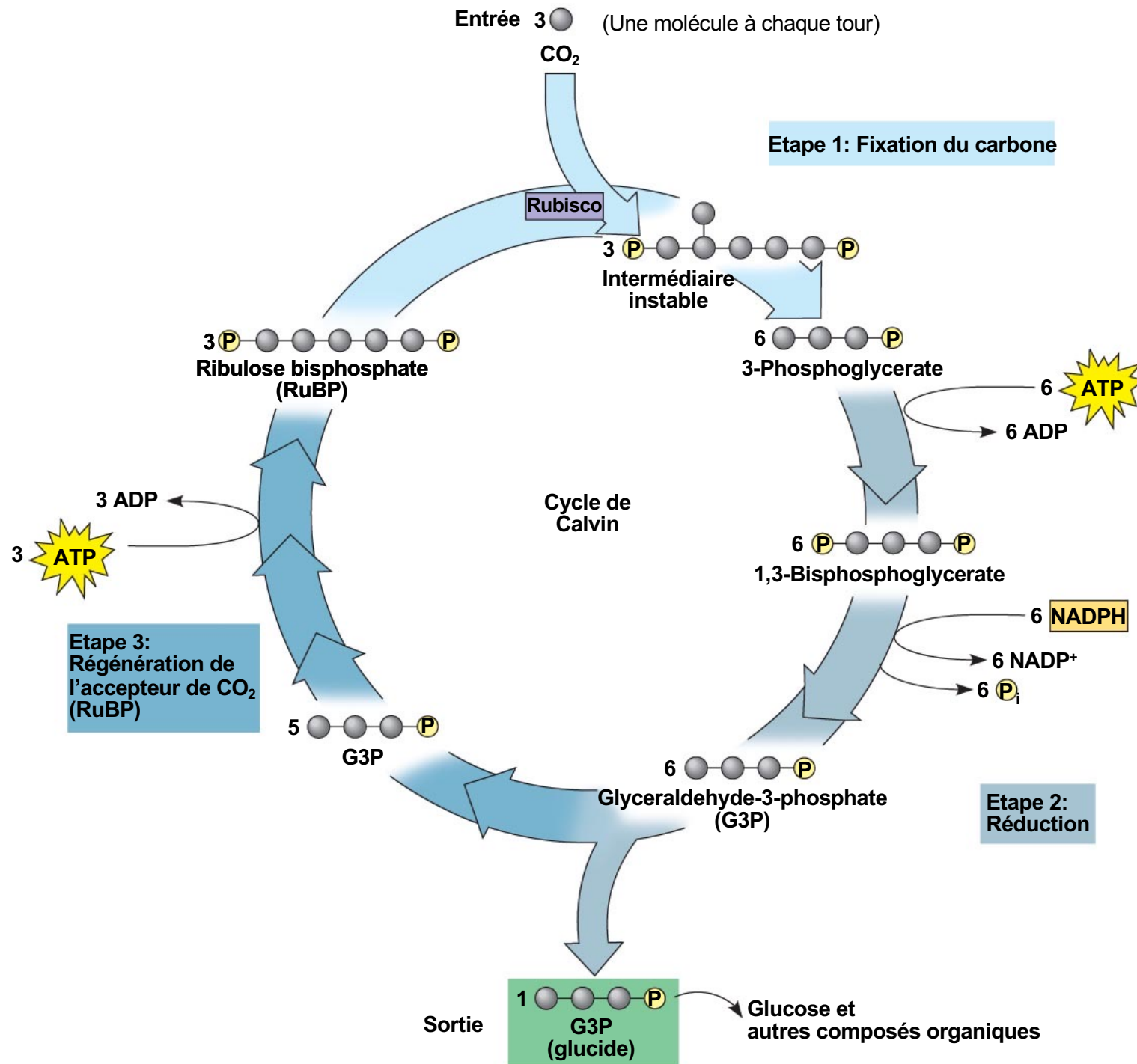
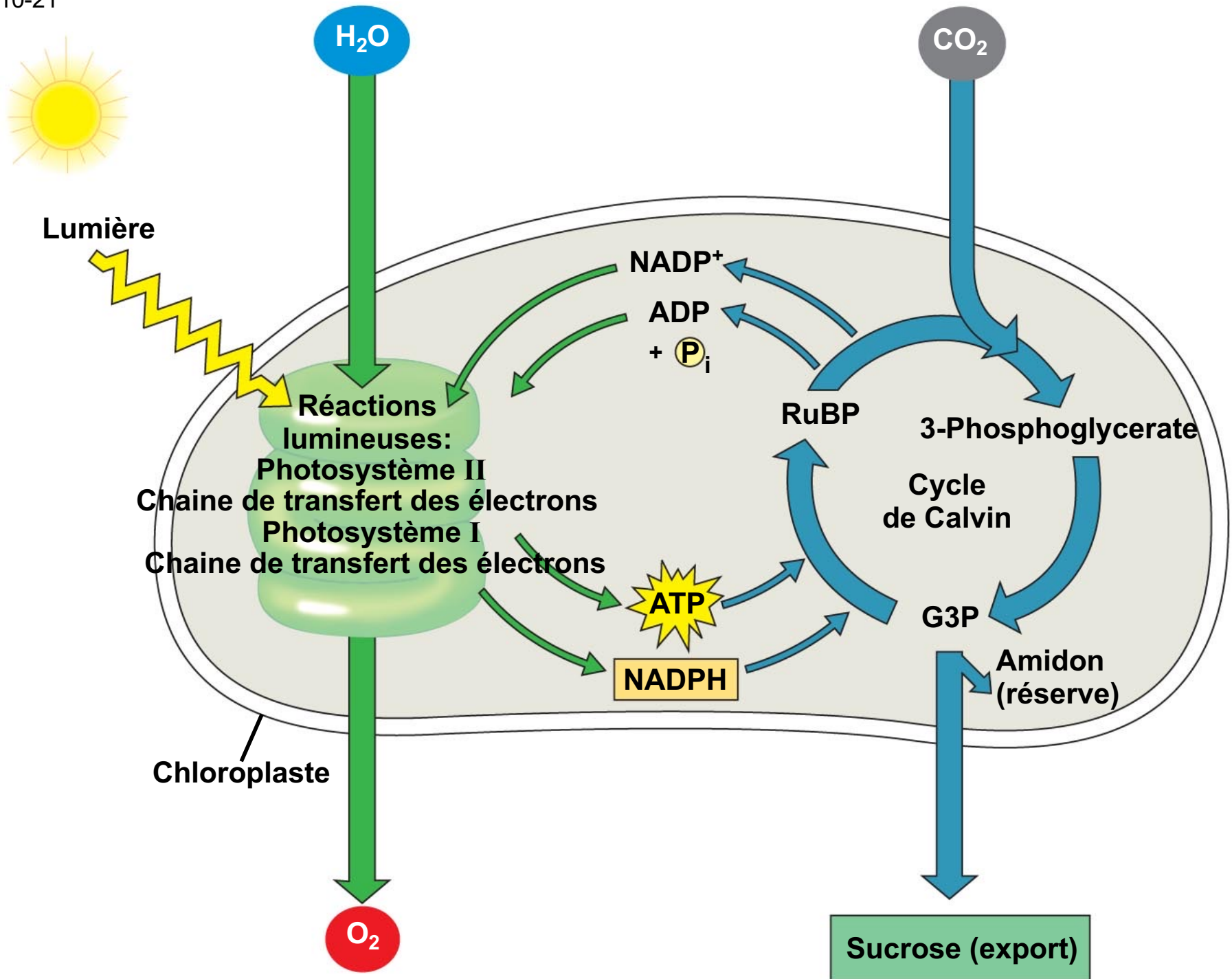


Fig. 10-21



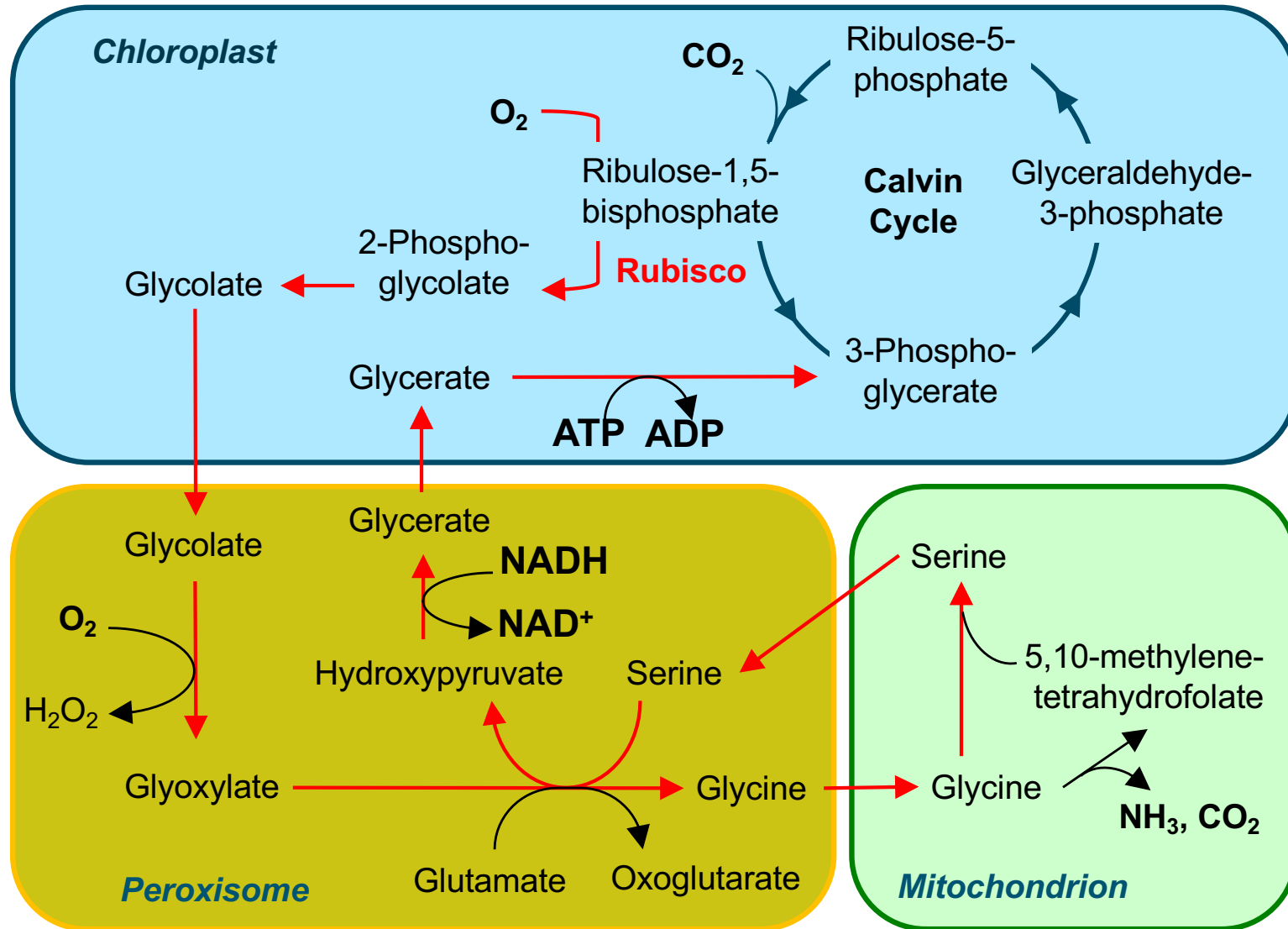
La photorespiration chez les plantes C3 : un compromis entre la photosynthèse et la prévention de la perte d'eau

- La plupart des plantes sont appelées plantes C3 car le produit organique de la fixation du carbone est un composé à 3 carbones (C3) – par exemple, le riz, le blé, les sojas
- Dans un climat chaud et sec, les plantes C3 ferment leurs stomates pour prévenir l'évaporation de l'eau
- Moins de CO₂ entre dans la feuille, ce qui va affamer le cycle de Calvin
- La Rubisco peut lier à la fois O₂ et CO₂ – Évolutionnairement, l'atmosphère contenait relativement peu de O₂

La photorespiration chez les plantes C3 : un compromis entre la photosynthèse et la prévention de la perte d'eau

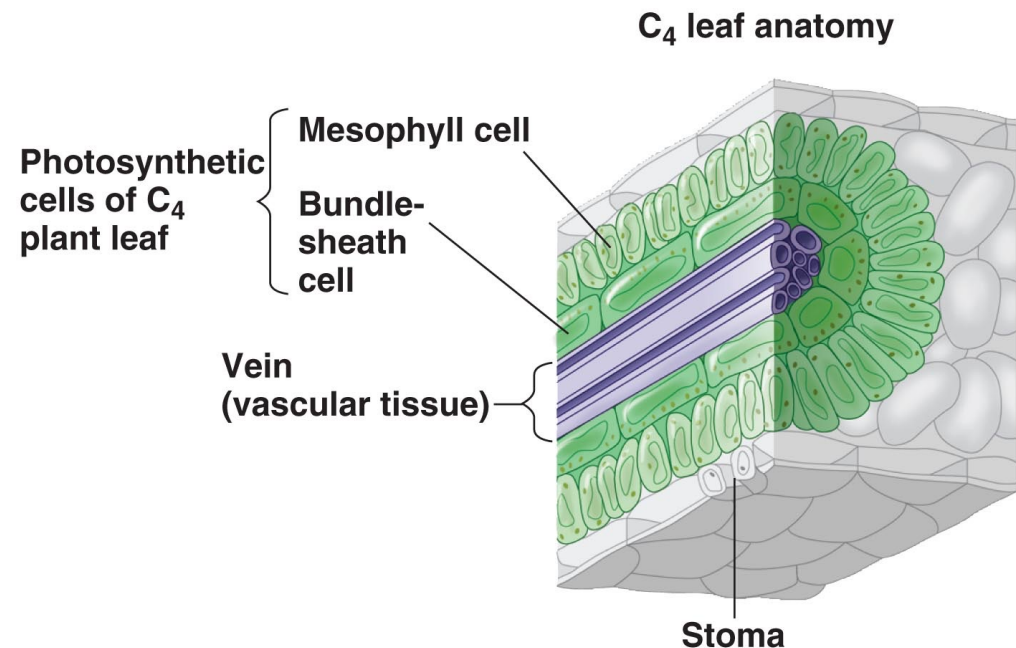
- La Rubisco, lors des jours chauds et secs, va se lier à l'O₂ au lieu du CO₂.
- Les produits du cycle de Calvin sont maintenant des fragments C₂, au lieu de C₃
- Les peroxysomes et les mitochondries réarrangent et divisent les fragments C₂ en CO₂, qui est libéré.
- Ceci est la photorespiration - elle nécessite de la lumière (photo) et consomme de l'O₂ tout en générant du CO₂ (respiration)
- La photorespiration ne produit pas de sucre et diminue le rendement photosynthétique (parfois jusqu'à 50 %).

Photorespiration



Les plantes C₄ fixent le carbone en formant d'abord un produit C₄ qui précède le cycle de Calvin

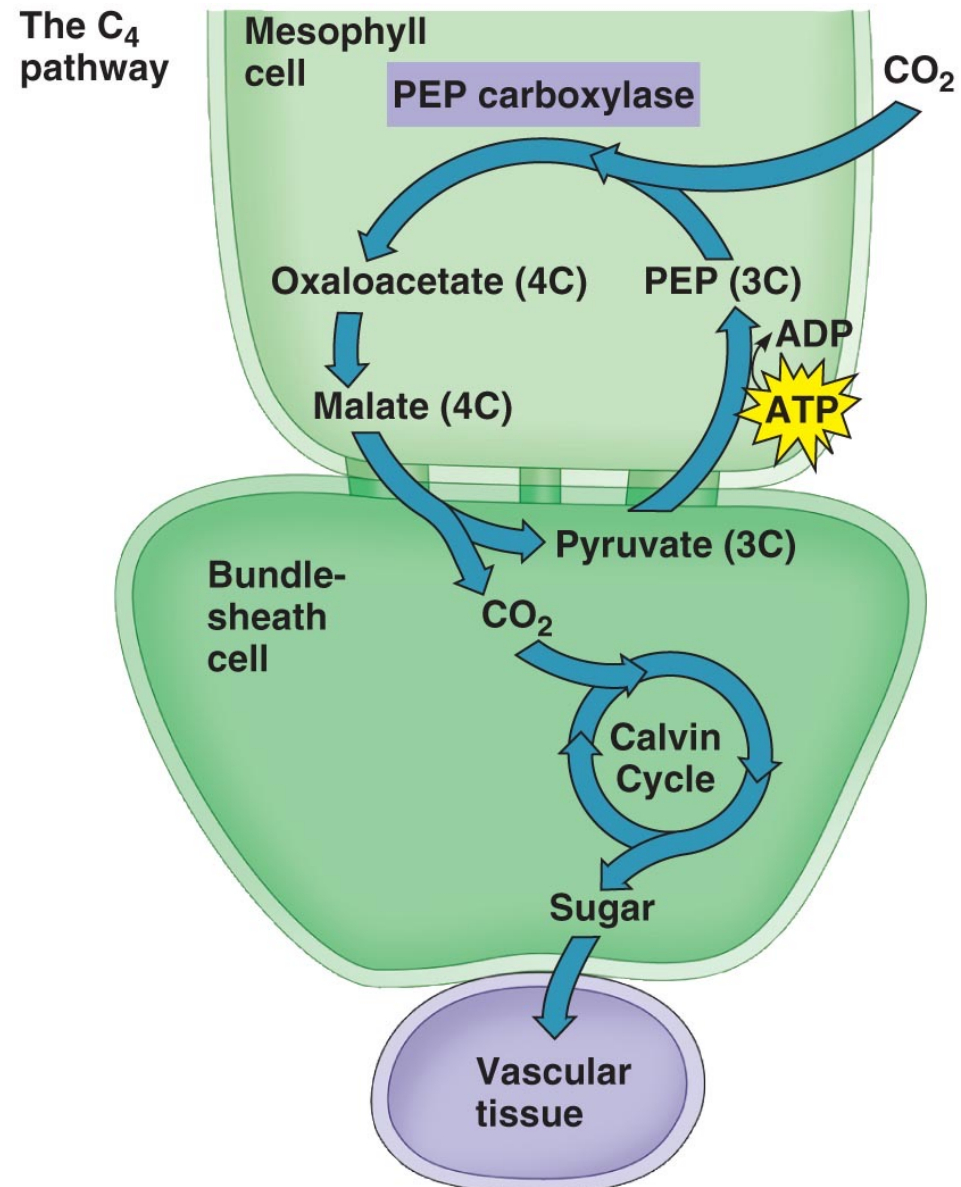
- Anatomie spéciale de la feuille avec 2 types de cellules photosynthétiques : les **cellules en gaine fasciculaire** et les **cellules du mésophylle**.
- Les cellules en gaine fasciculaire, qui sont emballées autour des veines de la feuille, effectuent le cycle de Calvin.
- Le maïs et la canne à sucre sont des plantes C₄.



Les plantes C4 fixent le carbone dans les cellules du mésophylle

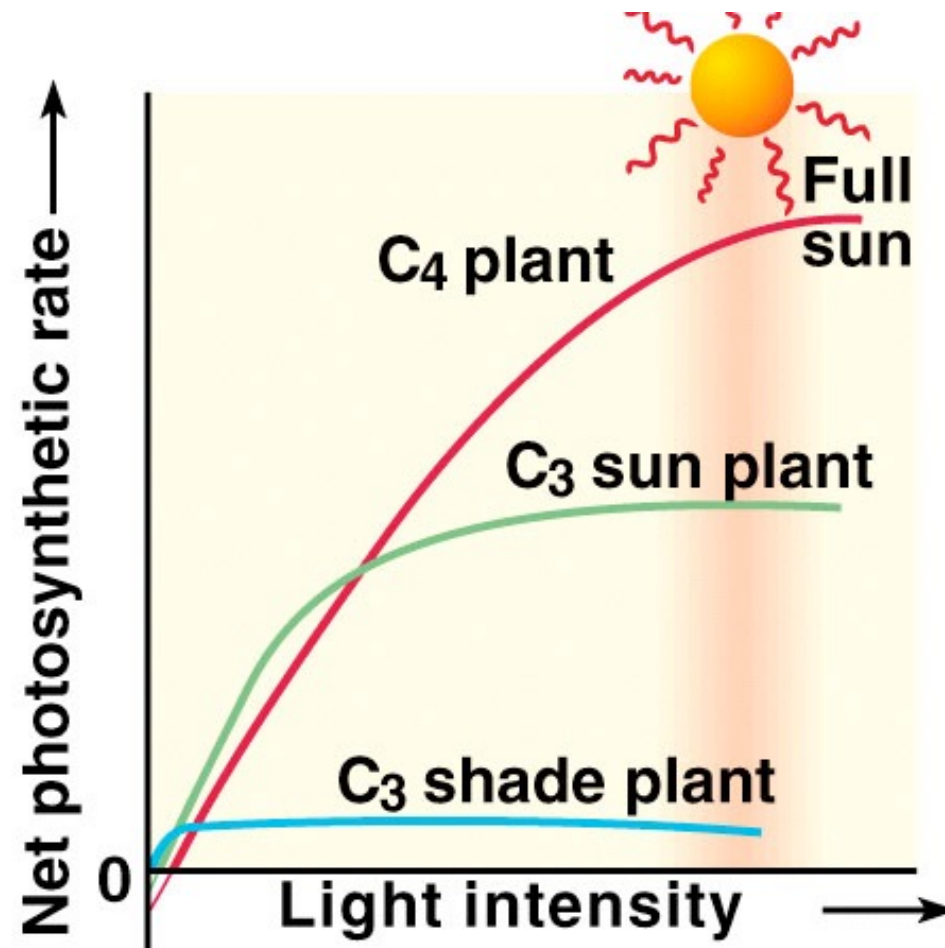
- La PEP carboxylase ajoute du CO₂ au phosphoénolpyruvate (PEP) formant de l'oxaloacétate (C₄) ; elle a une plus grande affinité pour le CO₂ que la rubisco et aucune affinité pour l'O₂.
- Les cellules du mésophylle exportent le produit C₄ vers les cellules en gaine fasciculaire à travers les plasmodesmes.
- Le composé C₄ libère alors du CO₂ et du pyruvate.
- Le CO₂ est réassimilé par la rubisco dans le cycle de Calvin.
- Le pyruvate est transporté dans la cellule du mésophylle et reconverti en PEP en utilisant de l'ATP issu de la respiration cyclique.

La voie C₄



Copyright © 2008 Pearson Education, Inc., publishing as Pearson Benjamin Cummings.

La photorespiration chez les plantes C₃ réduit la photosynthèse et rend les plantes C₄ plus adaptées aux climats chauds



Les plantes CAM séparent temporellement la fixation du carbone et le cycle de Calvin

- Le métabolisme acide des **crassulacées** ou **plantes CAM** sont des plantes succulentes (stockant de l'eau), telles que les cactus, les ananas.
- Ces plantes ouvrent leurs stomates pendant la nuit et les ferment pendant le jour.
- Le CO₂ capté la nuit est stocké dans des acides organiques.
- Pendant le jour, lorsque les réactions lumineuses peuvent fournir de l'ATP et du NADPH pour le cycle de Calvin, le CO₂ est libéré et incorporé dans le sucre.

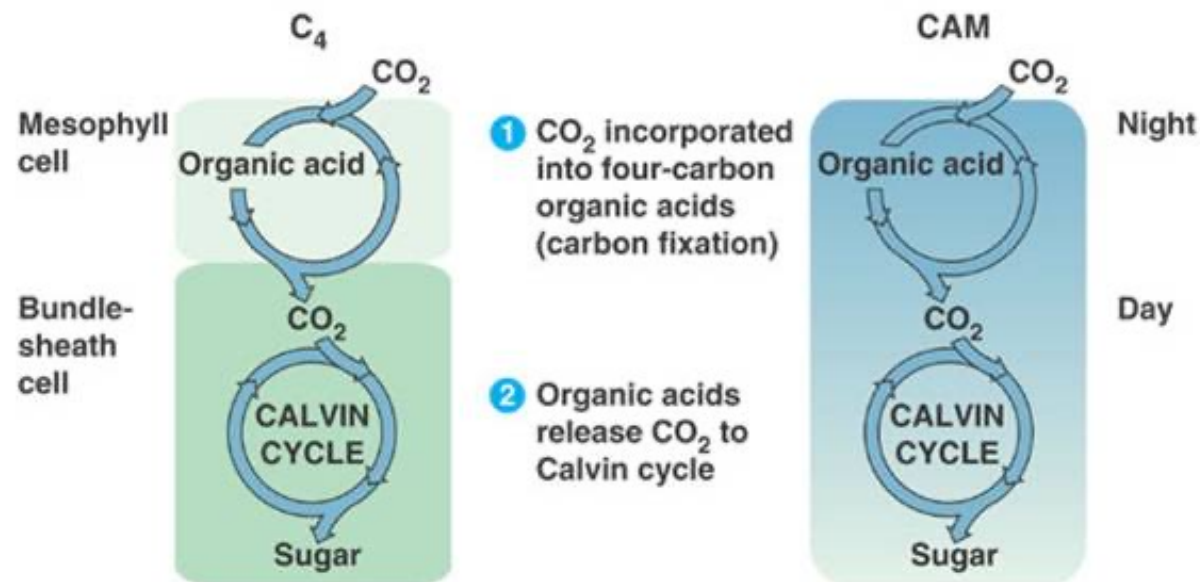
Les plantes C4 et CAM comparées



Sugarcane



Pineapple



(a) Spatial separation of steps

(b) Temporal separation of steps

L'importance de la photosynthèse: *révision*

- L'énergie lumineuse entrant dans les chloroplastes est transformée en énergie chimique dans des glucides.
 - Les glucides générés dans les chloroplastes fournissent à la plante l'énergie et les chaînes carbonées nécessaires à la synthèse des principales molécules organiques des cellules végétales.
 - Les plantes peuvent stocker l'excès de glucide sous forme **d'amidon** dans les racines, tubercules, graines et fruits.
 - La photosynthèse est à l'origine de presque tous les nutriments de cette planète et de l'O₂ dans notre atmosphère.
-

Fig. 10-21

