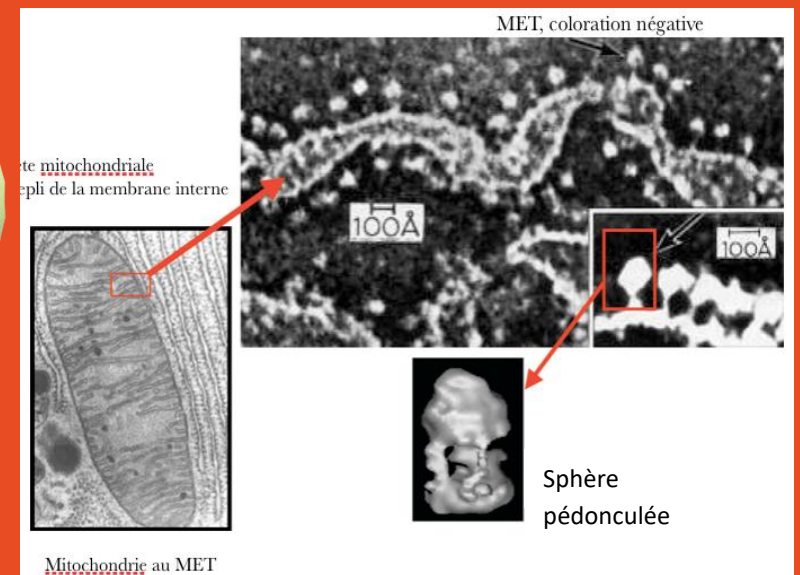
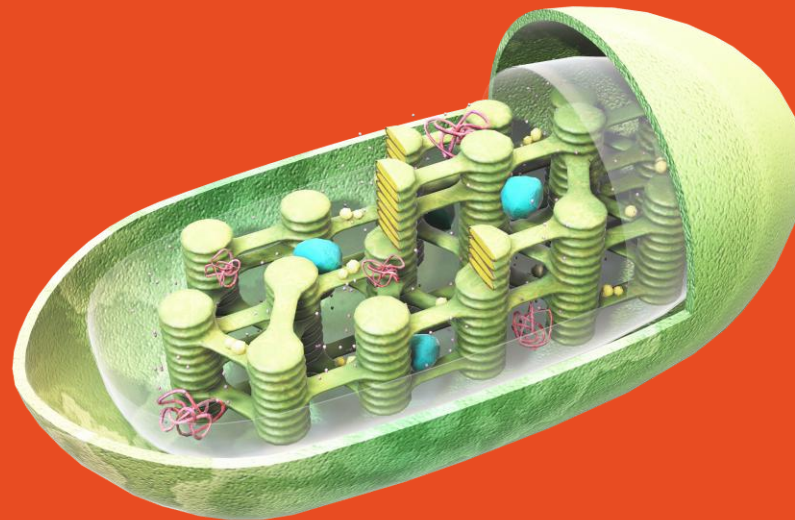
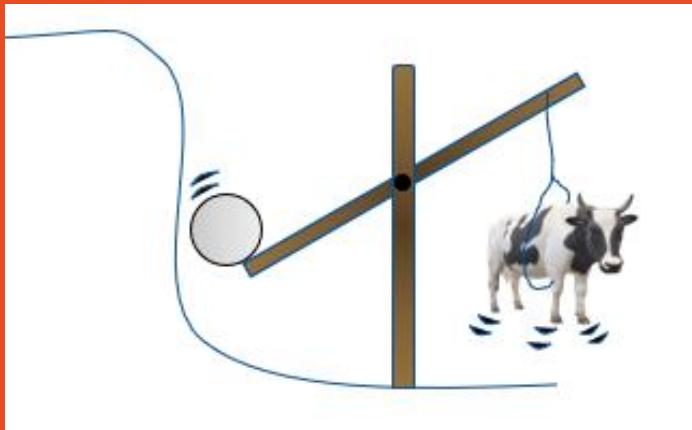


# SV-E-1 L'APPROVISIONNEMENT EN MATIÈRE ORGANIQUE

## SV-E LE MÉTABOLISME CELLULAIRE



# OBJECTIFS D'APPRENTISSAGE

## Savoirs visés

L'approvisionnement des cellules en matière organique se fait, soit par prélèvement direct dans l'environnement (hétérotrophes), soit par prélèvement puis réduction de matière minérale (autotrophes).

Les cellules autotrophes synthétisent de la matière organique par réduction de matière minérale. Au cours du cycle de Calvin, le carbone du  $\text{CO}_2$  est réduit en matière organique grâce aux produits de la phase photochimique.

L'hydrolyse de l'ATP fournit l'énergie nécessaire au fonctionnement du cycle et la régénération du ribulose 1,5 bisphosphate (RuBP).

La RubisCO est une enzyme clef permettant l'incorporation du  $\text{CO}_2$ . Dans le cas de la cellule végétale chlorophyllienne, l'énergie utilisée dans le cycle de Calvin provient de la conversion de l'énergie lumineuse (phototrophie).

Les électrons nécessaires à la réduction proviennent d'une molécule minérale, l'eau (lithotrophie).

La membrane des thylakoïdes contient des photosystèmes qui font partie d'une chaîne de transport d'électrons convertissant l'énergie lumineuse en énergie potentielle chimique.

L'ATP est synthétisée par couplage osmochimique grâce à l'ATP synthase.

La RubisCO est une enzyme oligomérique michaelienne à activité carboxylase (cycle de Calvin) et oxygénase (photorespiration).

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

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

## Capacités exigibles

- Construire un bilan de matière et d'énergie du cycle de Calvin

- Schématiser l'organisation fonctionnelle de la chaîne photosynthétique.

- Expliquer le modèle de la chaîne photosynthétique en utilisant les variations de potentiel d'oxydoréduction ( $\Delta E'$ ) et d'enthalpie libre de réaction ( $\Delta rG'$ ).

- Relier le principe de la conversion d'énergie aux caractéristiques de l'ATP-synthase.

- Schématiser l'organisation fonctionnelle de la chaîne de transfert d'électrons d'une bactérie nitratante (Nitrobacter).

- Expliquer le modèle de la chaîne de transfert des électrons chez les organismes chimolithotrophes en utilisant les variations de potentiel d'oxydoréduction ( $\Delta E'$ ) et d'enthalpie libre de réaction ( $\Delta rG'$ ).

- Comparer l'organisation fonctionnelle d'un thylakoïde et d'une membrane plasmique de bactérie nitratante.

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

# SV-E-1 L'approvisionnement en matière organique Introduction : les formes d'énergie dans une cellule

## SV-E-I-A Les formes d'énergie dans la cellule

### I. Les besoins énergétiques cellulaires et leur couverture par des sources énergétiques diversifiées

- A. L'organisation fonctionnelle de l'état cellulaire est indissociable d'un flux énergétique
- B. Les principes thermodynamiques

### II. Les formes d'énergie dans la cellule

- A. Les énergies de réaction
- B. Les énergies de gradients
- C. Les énergies d'oxydo-réduction
- D. L'énergie mécanique

### III. Les couplages énergétiques

- A. Couplage chimio-osmotiques
- B. Couplage osmo-chimique
- C. Couplage osmo-osmotique
- D. Couplage chimio-chimique
- E. L'énergie de réaction permet de faire tourner un cycle

## SV-E-I-B Approvisionnement et devenir des molécules

### I. L'approvisionnement et le devenir des molécules organiques ou minérales dans les cellules

- A. La MO est nécessaire au métabolisme de la cellule
- B. Les cellules hétérotrophes prélèvent la MO
- C. Les cellules autotrophes réduisent la MN prélevée en MO

### II. La photosynthèse assure la réduction des MN en convertissant l'énergie lumineuse

- A. La photosynthèse : une réduction du C minéral
- B. Le cycle de Calvin
- C. La chaîne photosynthétique
- D. La chimiosynthèse: cas de Nitrobacter

## SV-E-IC Pièce centrale des voies du métabolisme énergétique : l'ATP, un coenzyme nucléotidique de transfert de phosphoryle

### I. L'énergie d'hydrolyse d'un coenzyme nucléotidique, l'ATP

- A. Les liaisons phosphoanhydrides
- B.  $\Delta rG^{\circ}$  et  $\Delta rG'$  d'hydrolyse de l'ATP
- C. La position intermédiaire du potentiel d'hydrolyse de l'ATP

### II. De nombreuses transformations cellulaires exploitent des transferts de phosphoryle : utilisation majeure de l'ATP

- A. Des réactions de transfert de phosphoryle
- B. Le bilan sur les transferts de phosphoryle

### III. Les couplages permettant la synthèse d'ATP

- A. La formation d'ATP par transphosphorylation
- B. La formation d'ATP par conversion d'une force protomotrice

# INTRODUCTION

- Rappels de thermodynamique, en fonction de la nature des échanges, on distingue différents types de systèmes:
  - Système isolé: ni échange de matière ni d'énergie avec le milieu extérieur. (idéalisation des systèmes réels)
  - Système fermé: uniquement échange d'énergie avec le milieu extérieur
  - Système ouvert: échange de matière et d'énergie avec le milieu extérieur



La cellule est donc un système thermodynamiquement ouvert!

## A. L'ORGANISATION FONCTIONNELLE DE L'ÉTAT CELLULAIRE EST INDISSOCIABLE D'UN FLUX ÉNERGÉTIQUE



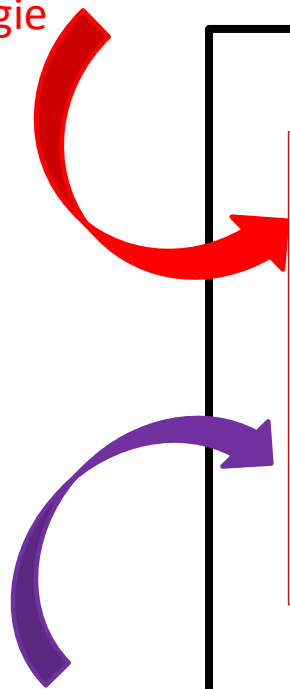
### I. La représentation globale d'une cellule, système thermodynamiquement ouvert

- Dans les cellules, Il y a **3** principaux **types de « travaux »** réalisés qui consomment de l'énergie, en lien avec diverses fonctions (biosynthèses, transport, signalisation...).
- Le travail **chimique** :
  - ✓ Les réactions de biosynthèse : production de biomolécules à partir de précurseurs
  - ✓ Autres réactions (ex : réparation de l'ADN)
- Le travail **osmotique** :
  - ✓ Transports transmembranaires actifs : pompes, symports, antiports
  - ✓ Mise en place et maintien de gradients (électro)chimiques
- Le travail **mécanique** :
  - ✓ Trafic vésiculaire et déplacement des chromosomes
  - ✓ Contraction musculaire
  - ✓ Motilité cellulaire

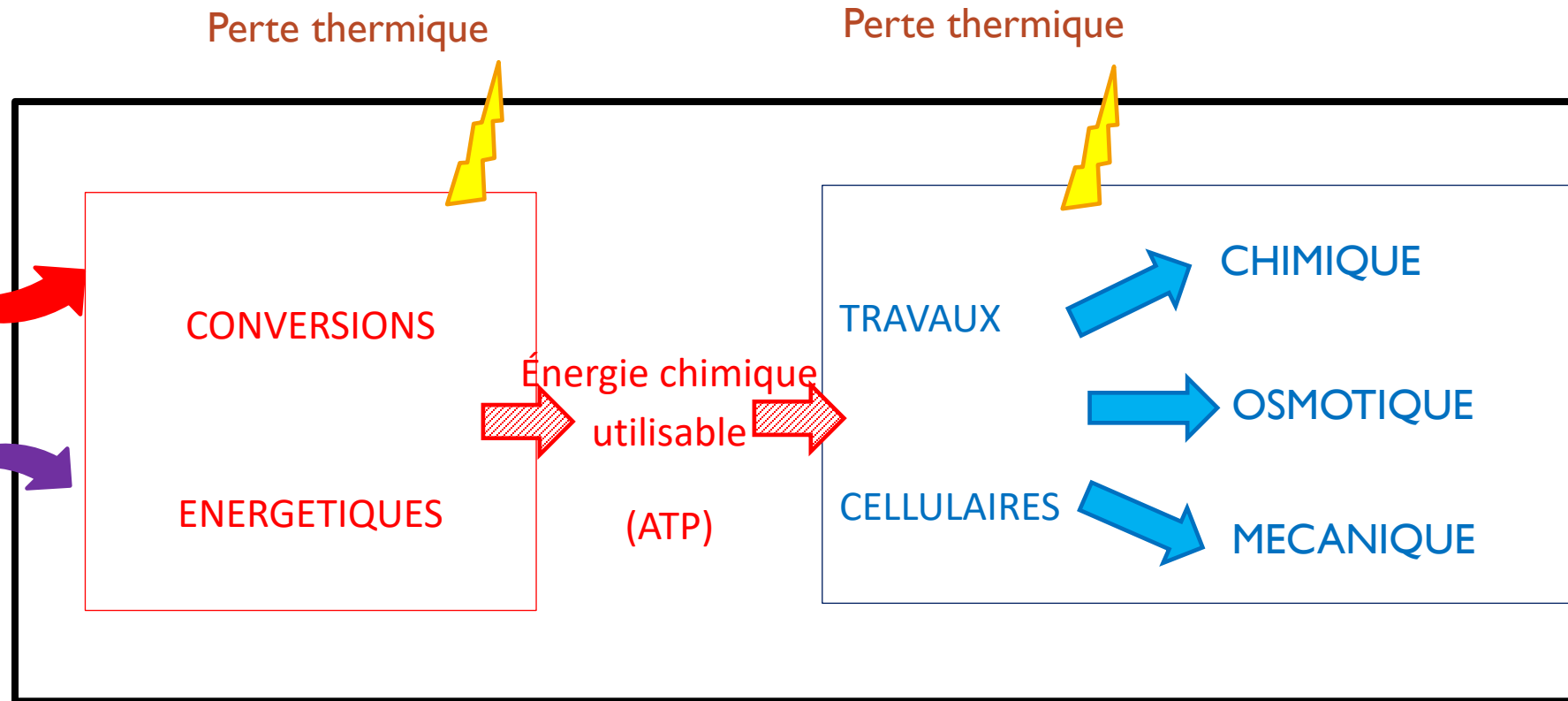
Citez les travaux cellulaires d'une cellule eucaryote



Énergie lumineuse, énergie chimique des molécules minérales (redox), énergie de gradients



Énergie chimique potentielle des molécules organiques



*Cellule = système thermodynamiquement ouvert*

# A. L'ORGANISATION FONCTIONNELLE DE L'ÉTAT CELLULAIRE EST INDISSOCIABLE D'UN FLUX ÉNERGÉTIQUE



## 2. Suivant le degré d'organisation ou de spécialisation cellulaire, des dépenses énergétiques plus spécifiques

### 2.1. Entre eubactéries et eucaryotes, des différences de degré d'organisation et de dépenses énergétiques

- Degrés d'organisation différents => plus d'énergie nécessaire pour eucaryotes
- différences dans l'organisation des dépenses
  - ex : pour bouger bactéries ≠ protozoaires
- protozoaires : mobilité par couplage chimio-mécanique
- eubactéries : mobilité par couplage osmo-mécanique

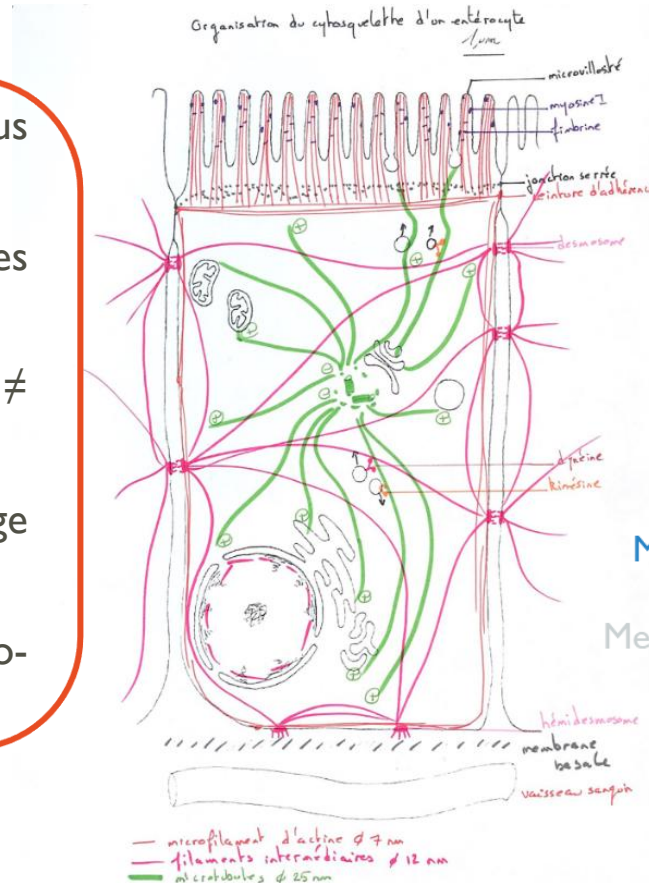
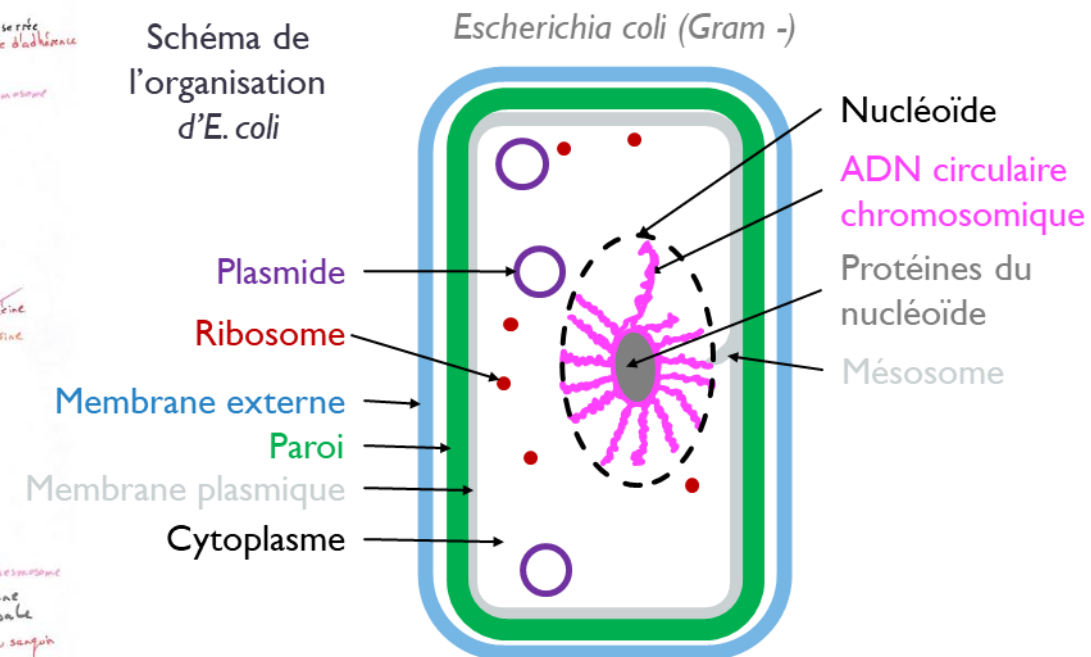
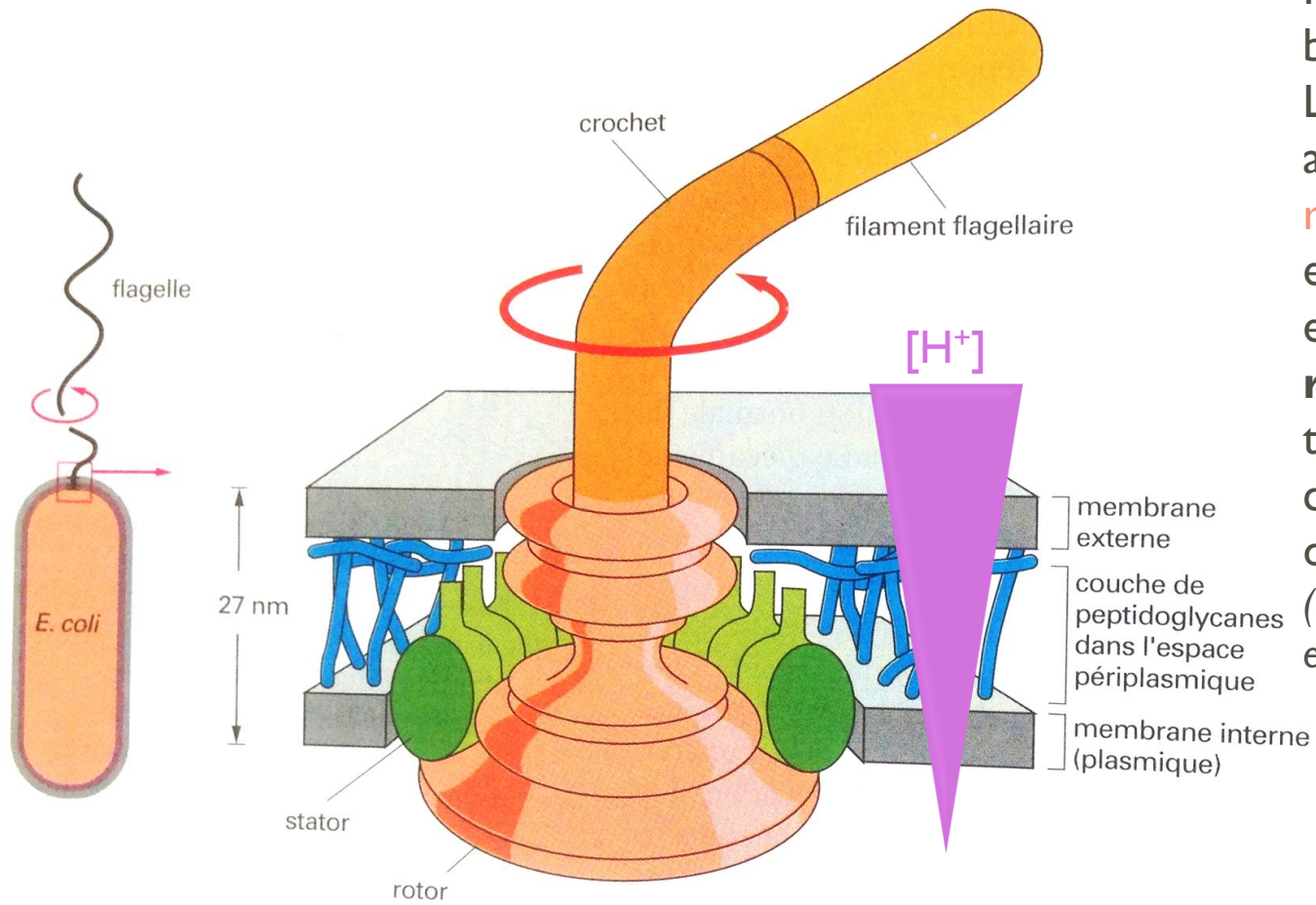


Schéma de l'organisation d'E. coli



Cf SV-C-3



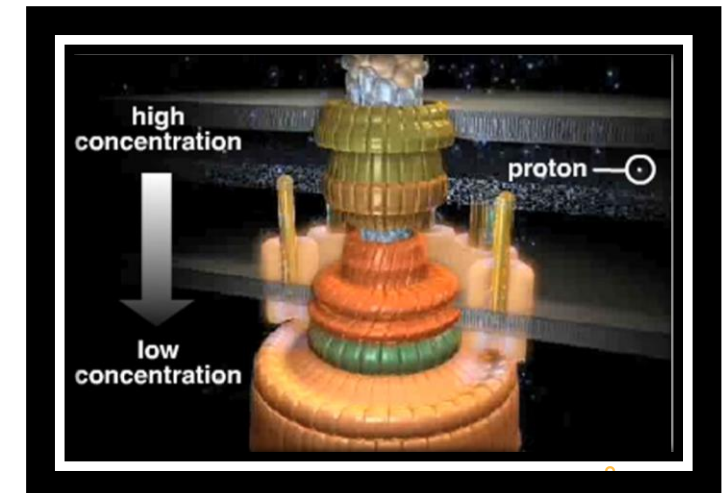
## Représentation schématique du moteur flagellaire bactérien

Le flagelle est lié à un crochet flexible. Le crochet est attaché à une **série d'anneaux protéiques (montrée en rose)**, qui sont enfouis dans les membranes plasmiques externes et internes, et qui pivotent avec le flagelle à environ 150 révolutions par seconde. **On pense que la rotation est conduite par un flux de protons** à travers un anneau externe de protéines (le stator), qui contient aussi les protéines responsables du changement de direction de la rotation

(d'après les résultats de T. Kubori et al. *J. Mol. Biol.*, 226:433-446, 1992, et N.R. Francis et al., *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 89: 6304-6308, 1992.)

*Le flagelle bactérien, un moteur permis par un flux protonique, couplage osmo-mécanique*

Travail mécanique par couplage osmo-mécanique  
chez les bactéries



- Spermatozoïde en 4 parties :

### 1) Tête avec...

- ✓ un acrosome → rôle dans l'entrée dans l'ovule
- ✓ le noyau → transmission de l'info° génétique

### 2) Pièce intermédiaire : riche en mitochondries

- rôle énergétique

### 3) Flagelle : contient un axonème = 9 doublets de microtubules (et 2 centraux), mouvement relatif par des « bras » de dynéine

- ondulation, déplacement

Spermatozoïde = cellule spécialisée dans la fonction de reproduction et cellule motile

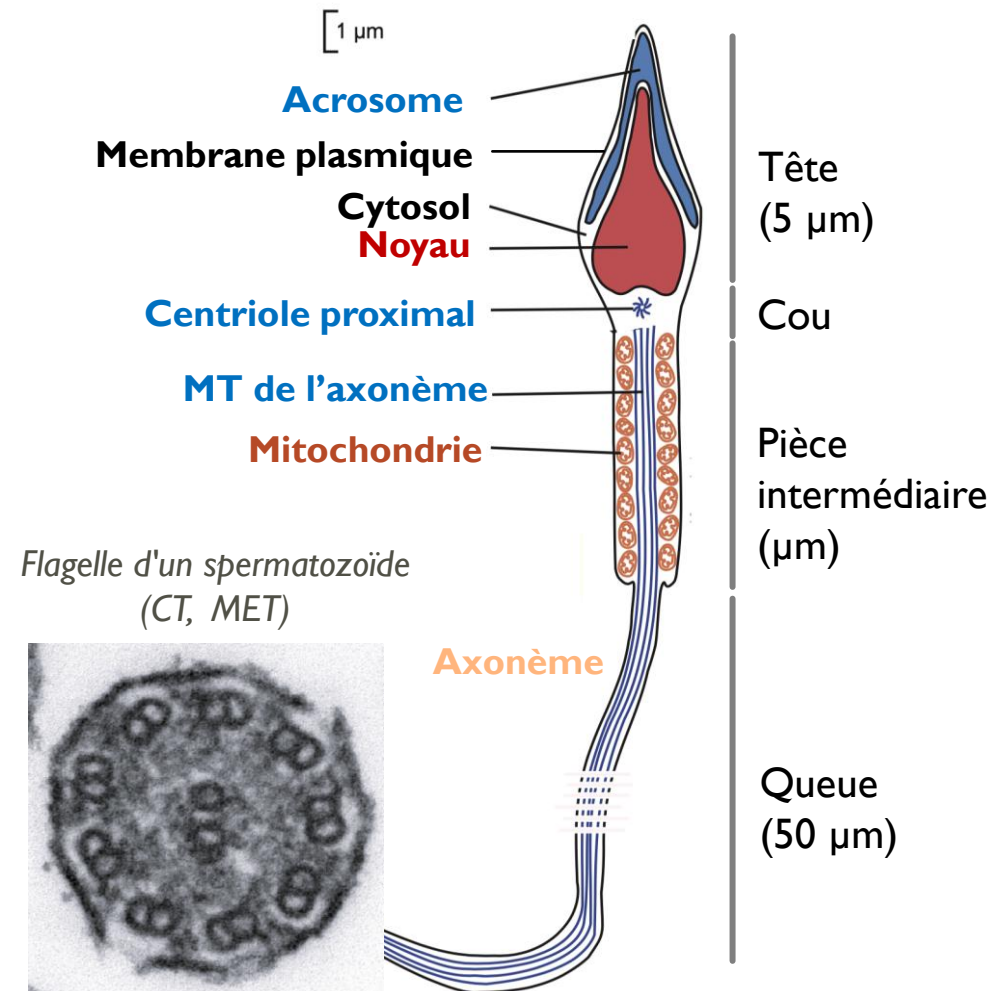
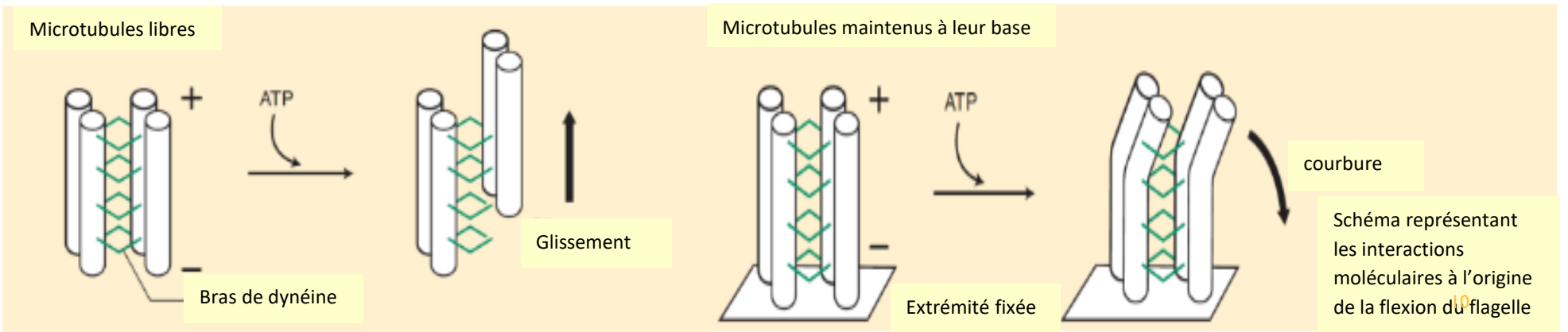
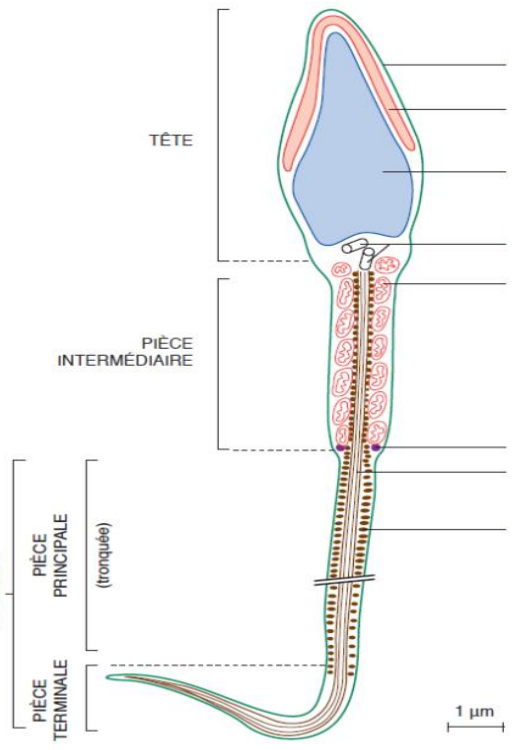
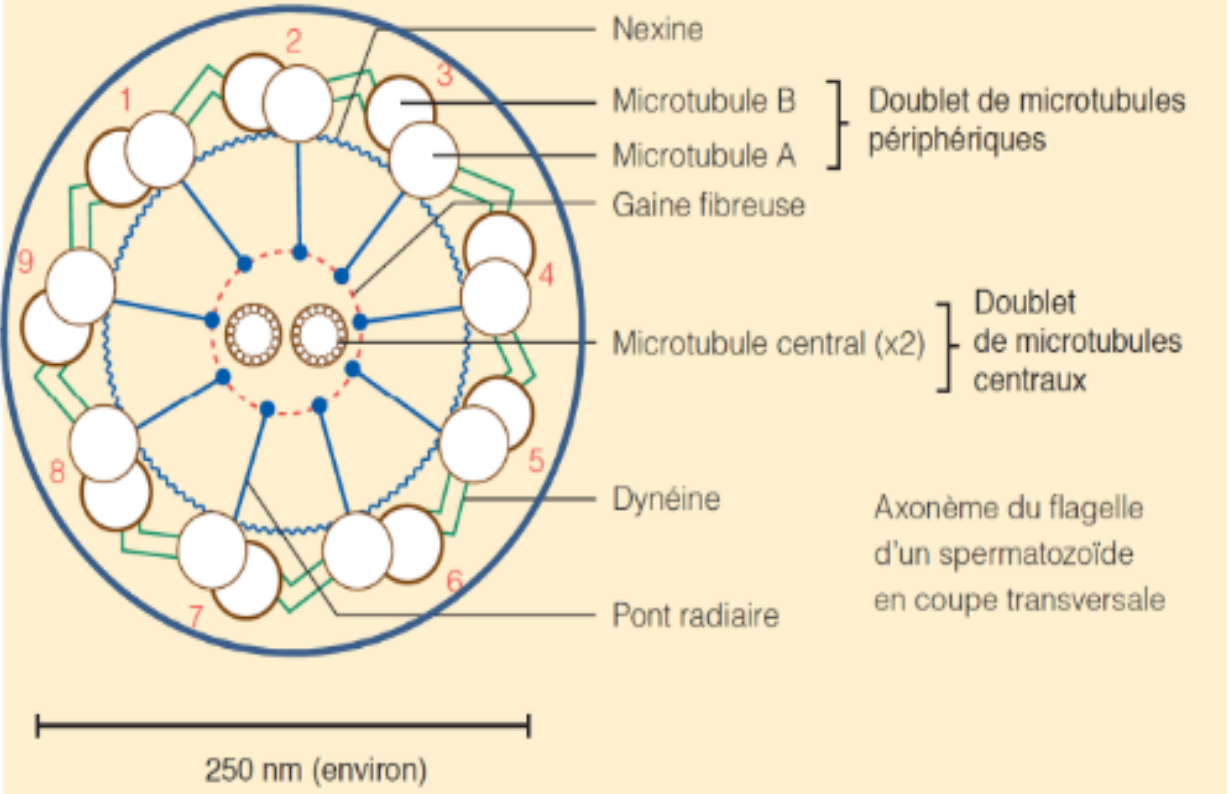
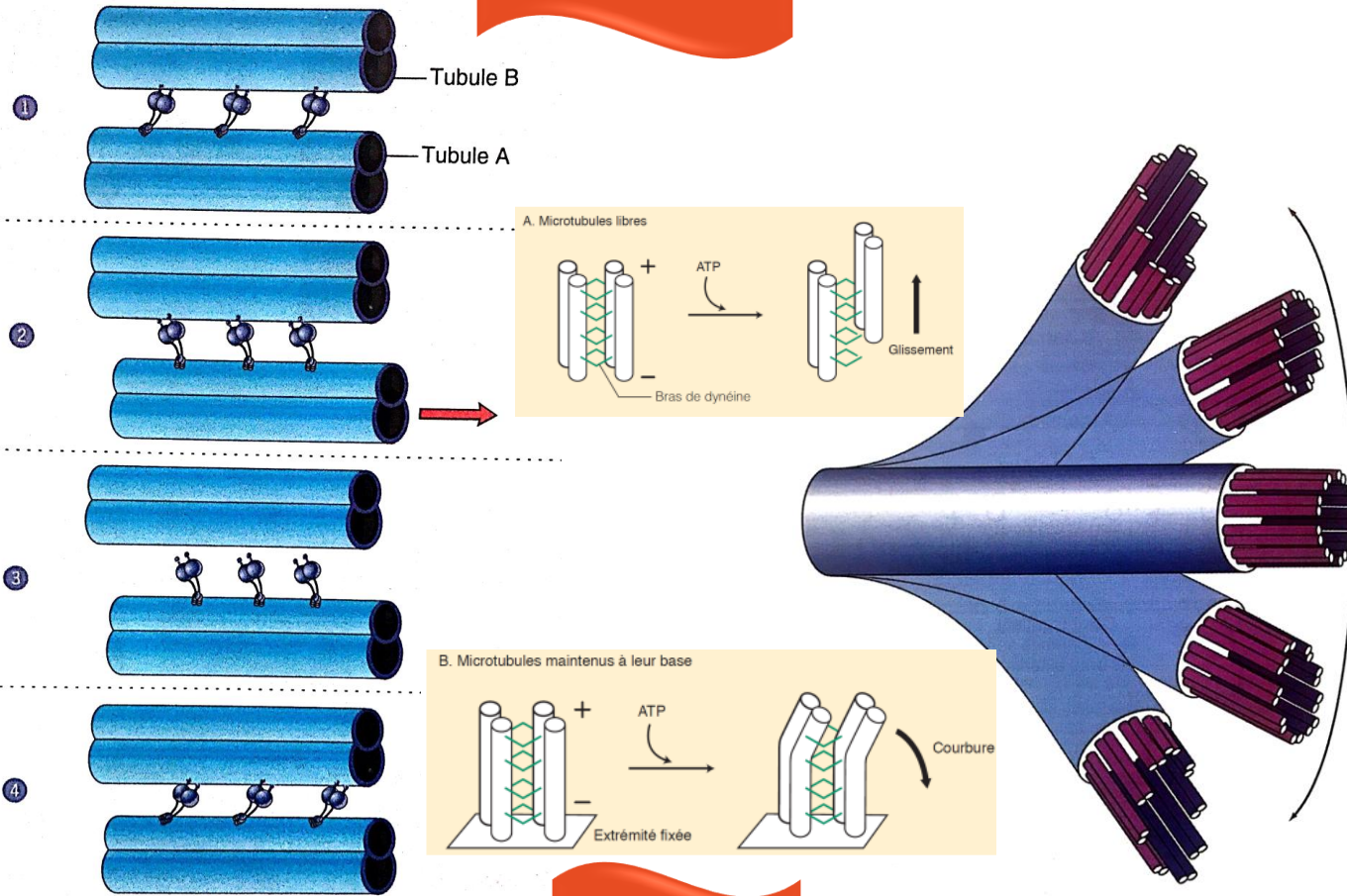


Schéma d'un spermatozoïde de mammifère (Franquinet, 1998)

Travail mécanique par couplage chimio-mécanique chez les eucaryotes



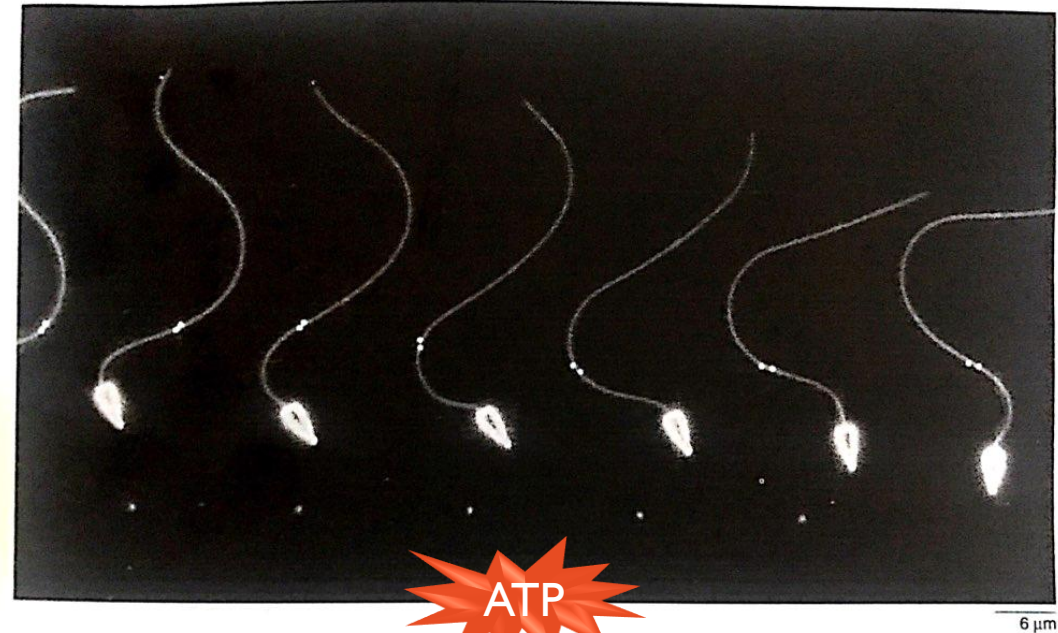
## coulissement



## courbure

**Figure 9.38 Mécanisme de glissement des microtubules dans la motilité des cils ou des flagelles.** Schéma représentant le glissement relatif de microtubules voisins. Lorsque le cil est raide, tous les doublets externes se terminent au même niveau (*centre*). Le cil se courbe quand les doublets situés d'un côté de la courbure coulisent sur les autres (*au-dessus et en dessous*). La force responsable du glissement des microtubules voisins est représentée à la figure précédente. (D'après D. Voet et J.G. Voet, *Biochemistry*, 2<sup>e</sup> éd., Copyright 1995 John Wiley and Sons, Inc. ; reproduit avec l'autorisation de John Wiley and Sons, Inc.)

Coulissement des tubules A et B via les **dynéines ATPasiques**



**Figure 9.39 Démonstration expérimentale du glissement des microtubules.** On a enlevé la membrane du spermatozoïde d'ourchin, on l'a réactivé par l'ATP et photographié par expositions multiples comme à la figure 9.34. Dans cette expérience, on a attaché, aux microtubules des doublets externes dénudés, des billes d'or pour marquer des sites spécifiques le long des différents doublets. Lorsque le flagelle bat, on contrôle la position relative

des billes. Comme on le voit ici, les billes s'écartent puis se rapprochent lorsque le flagelle ondule, ce qui indique que les doublets coulisent vers l'avant et vers l'arrière les uns par rapport aux autres. (D'après Charles J. Brokaw, *J. Cell Biol.* 114, couverture du n° 6, 1991 ; avec l'autorisation de reproduction de Rockefeller University Press.)

La dynéine est ATPasique

# A. L'ORGANISATION FONCTIONNELLE DE L'ÉTAT CELLULAIRE EST INDISSOCIABLE D'UN FLUX ÉNERGETIQUE

## 2. Suivant le degré d'organisation ou de spécialisation cellulaire, des dépenses énergétiques plus spécifiques

### 2.1. Entre eubactéries et eucaryotes, des différences de degré d'organisation et de dépenses énergétiques

- Des niveaux de dépenses différents.
  - Les Eucaryotes ont un degré d'organisation supérieur à celui des Eubactéries
    - plus d'énergie nécessaire pour les Eucaryotes
- Des différences dans l'organisation des dépenses  
Ex : Déplacement cellulaire des Eubactéries et d'un spermatozoïde (Eucaryote)

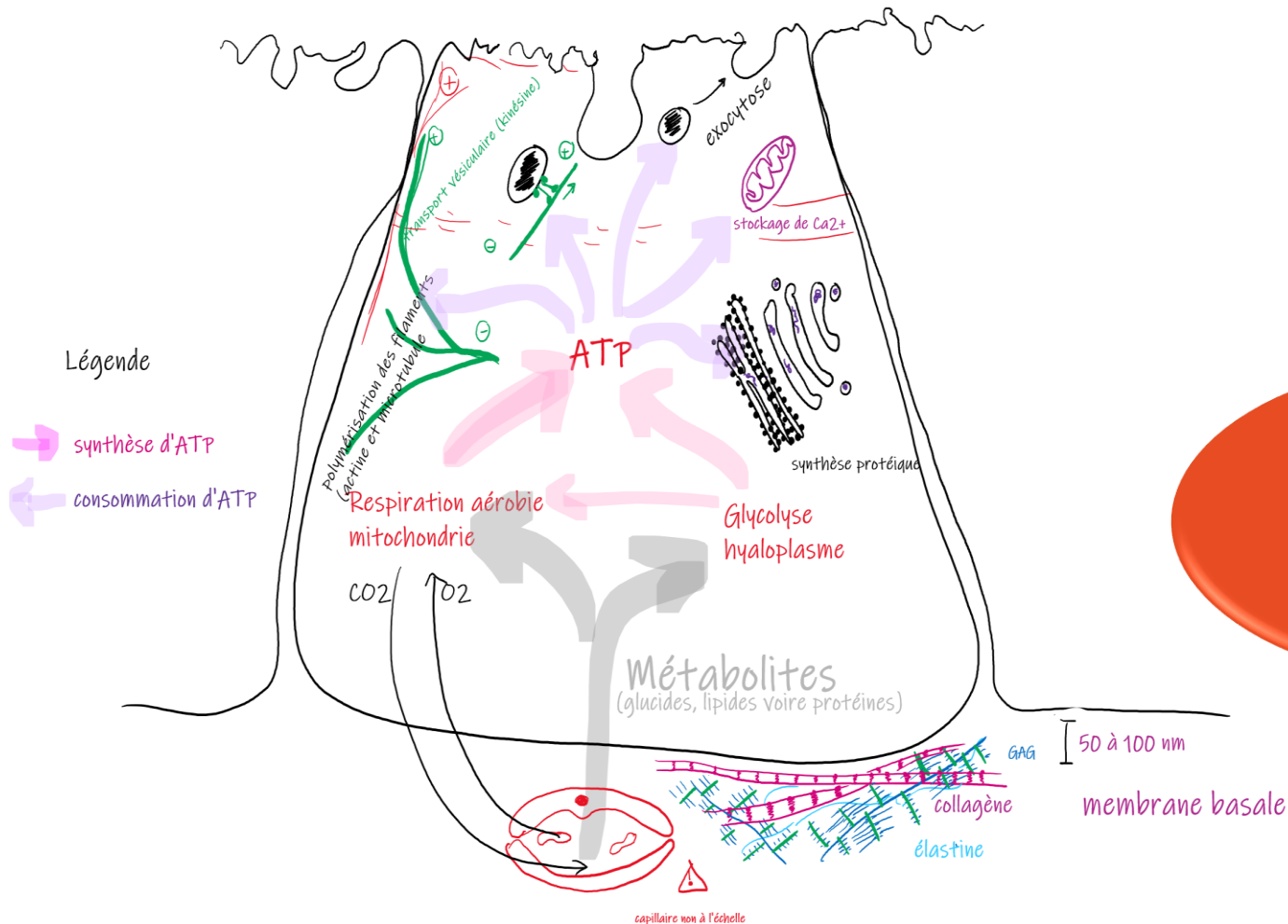
[https://www.youtube.com/watch?v=hm4Brdx\\_is8](https://www.youtube.com/watch?v=hm4Brdx_is8)

<https://www.youtube.com/watch?v=6zymHlvPo7s>



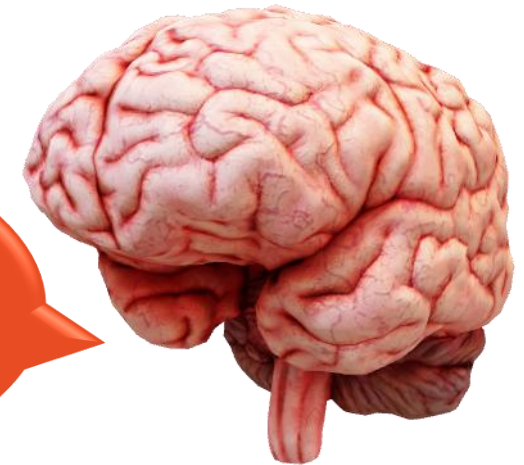
# A. L'ORGANISATION FONCTIONNELLE DE L'ÉTAT CELLULAIRE EST INDISSOCIABLE D'UN FLUX ÉNERGÉTIQUE

2.2. Entre les types cellulaires eucaryotes, des spécialisations cellulaires très différentes associées à des dépenses énergétiques également spécifiques

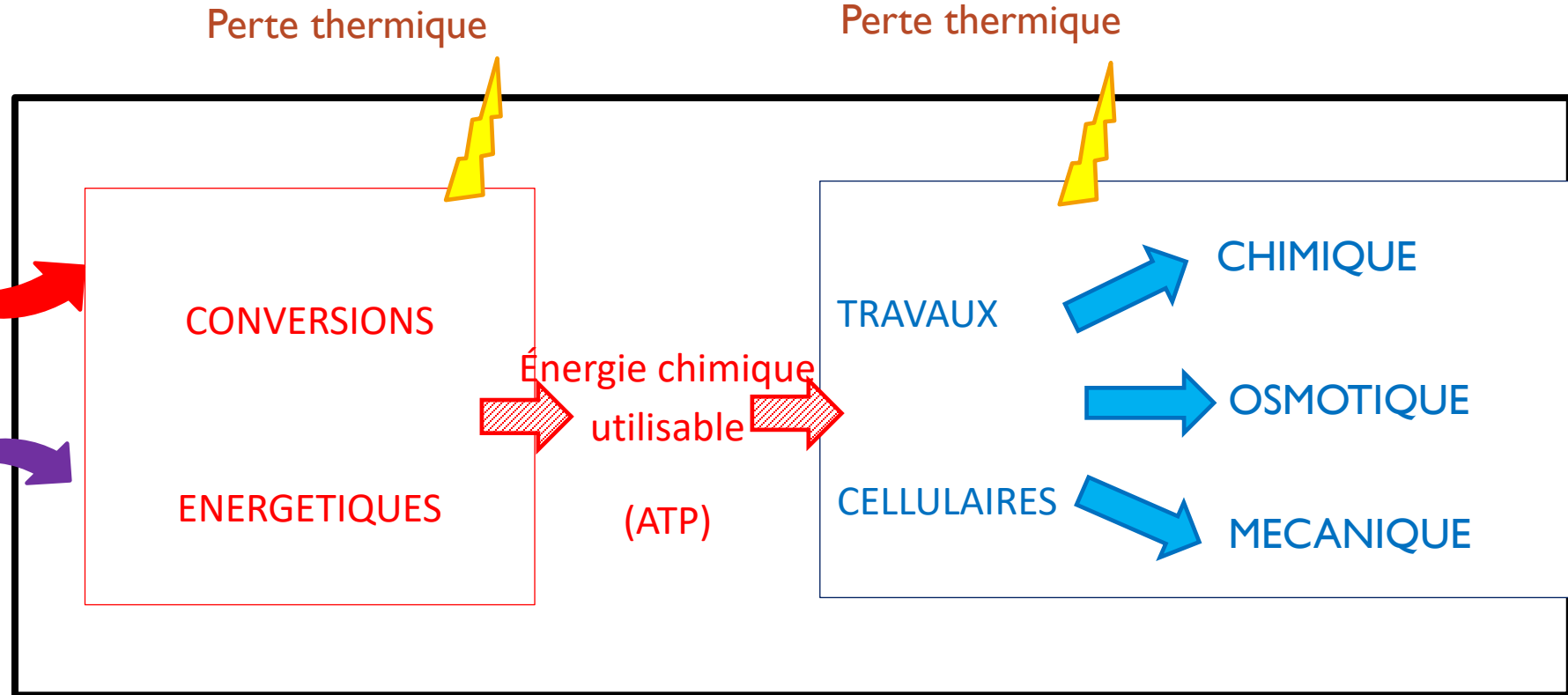
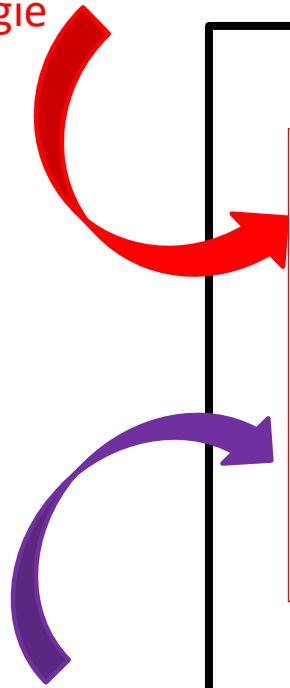


Flux d'énergie dans la CAP (S. Dalaine)

Enumérer l'ensemble des dépenses énergétiques associées à l'activité d'un neurone



Énergie lumineuse, énergie chimique des molécules minérales (redox), énergie de gradients



Énergie chimique potentielle des molécules organiques

*Cellule = système thermodynamiquement ouvert*

## B. LES PRINCIPES THERMODYNAMIQUES

### I. Premier principe de la thermodynamique : l'énergie totale de l'univers est constante

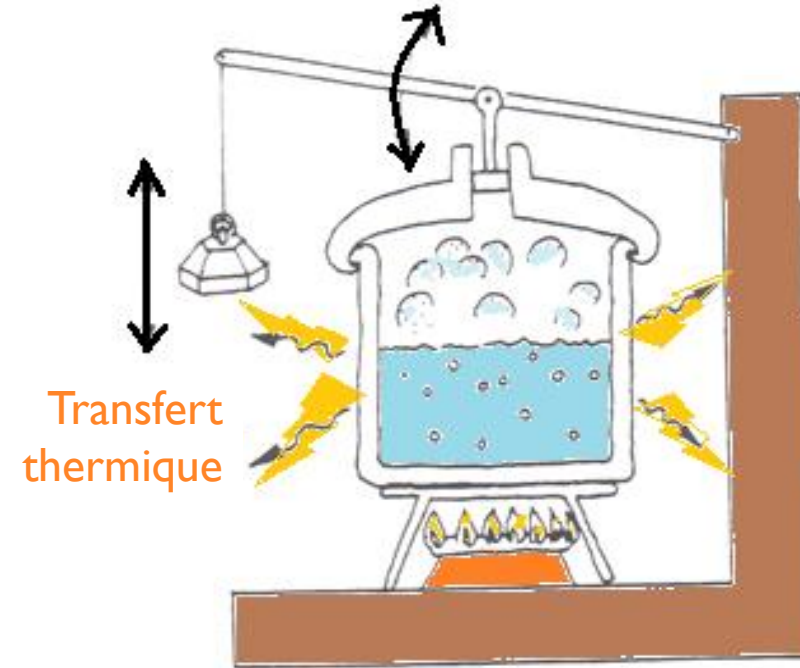
1<sup>er</sup> ppe : l'énergie totale de l'Univers est constante:  $\Delta U_{\text{univers}} = 0$

**U** : énergie interne du système, fonction d'état ( $\Delta U$  ne dépend pas du chemin suivi, mais dépend seulement des positions de départ et d'arrivée)

énergie d'un point de vue thermodynamique est ce qui permet la réalisation d'un travail

$$dU = \delta W + \delta Q$$

Dans une cellule  $\delta W = 0$  ainsi  $dU = \delta Q$



*Variation d'énergie interne et échanges avec le milieu*

L'enceinte reçoit une énergie thermique et convertit une part de cette énergie en travail. L'énergie gagnée par l'enceinte est celle perdue par l'environnement, et inversement

## B. LES PRINCIPES THERMODYNAMIQUES

### 2. 2<sup>nd</sup> principe de la thermodynamique : l'entropie $S$ de l'univers augmente

L'entropie  $S$  est une fonction d'état qui mesure le niveau de désordre.

#### L'ENTHALPIE LIBRE $G$

$$G = H - T.S$$

$G$  : enthalpie libre ( $J$ )

$H$  : enthalpie ( $J$ )

$T$  : température ( $K$ )

$S$  : entropie ( $J.K^{-1}$ )

L'enthalpie libre  $\Delta G$  ( à  $T^{\circ}C$  et  $P$  constants) quantifie la part d'énergie d'un système qui produit un travail utile.

## B. LES PRINCIPES THERMODYNAMIQUES

### 2. 2<sup>nd</sup> principe de la thermodynamique : l'entropie $S$ de l'univers augmente



#### L'enthalpie libre standard apparente de réaction $\Delta rG^\circ$

Cf slide 23

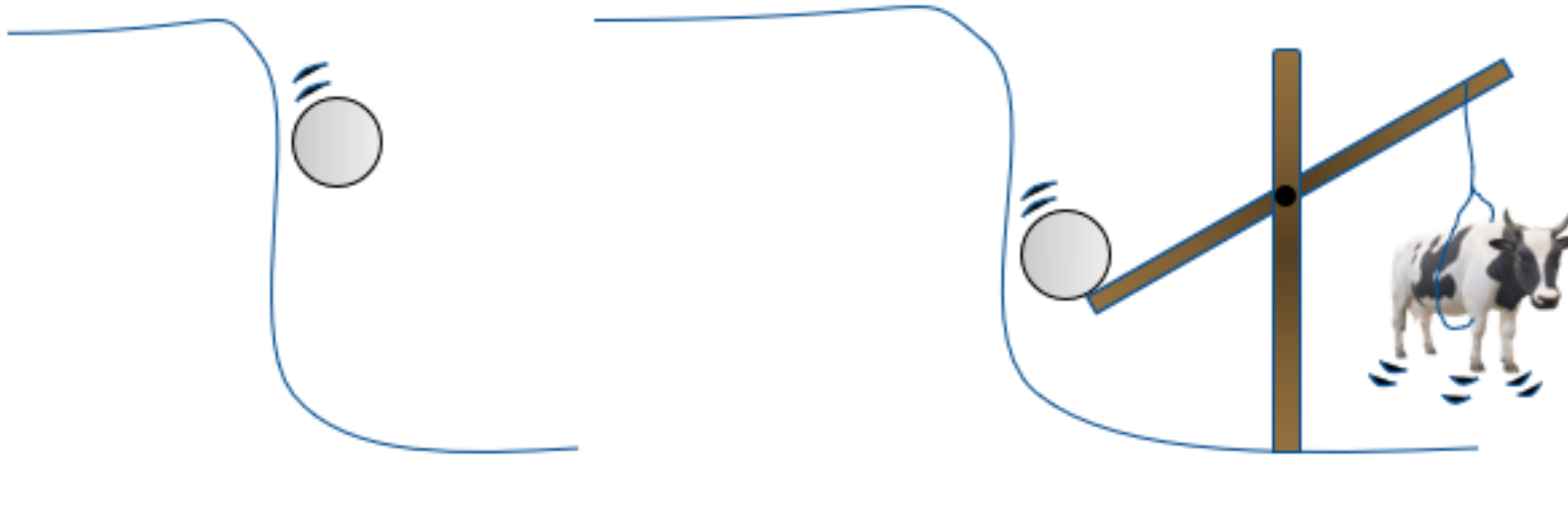
En biologie, on considère que l'enthalpie libre de réaction,  $\Delta rG'$ , est l'énergie molaire ( $\text{kJ.mol}^{-1}$ ) utilisable par la cellule.

En outre, toute réaction défavorable (i.e. à  $\Delta rG^\circ > 0$ ) ne pourra se réaliser que si elle est couplée à une réaction favorable (i.e.  $\Delta rG^\circ < 0$ ); la somme des enthalpies libres standard de réaction devra être  $< 0$

Rappel de chimie:  $\Delta rG^\circ < 0$  est l'équivalent de  $K^\circ > 1$

## B. LES PRINCIPES THERMODYNAMIQUES

### 2. 2<sup>nd</sup> principe de la thermodynamique : l'entropie $S$ de l'univers augmente



*Couplage et enthalpie libre*

De l'importance d'un système de couplage pour faire grimper la vache! Meuh!

## B. LES PRINCIPES THERMODYNAMIQUES

### 2. 2<sup>nd</sup> principe de la thermodynamique : l'entropie $S$ de l'univers augmente

Molécules mic et mec en désordre permanent  
⇒ équilibre thermodynamique entre la cellule et son environnement

- Dans notre cas:  $Q = \Delta H = T\Delta S$   
Si polymérisation de molécules dans mic alors  $\downarrow$  de  $S$  dans mic donc  $Q < 0$  et transfert thermique de mic au profit de mec
- La polymérisation des molécules dans le mic diminue l'entropie du système et donc augmente celle de l'environnement (mec) par transfert thermique

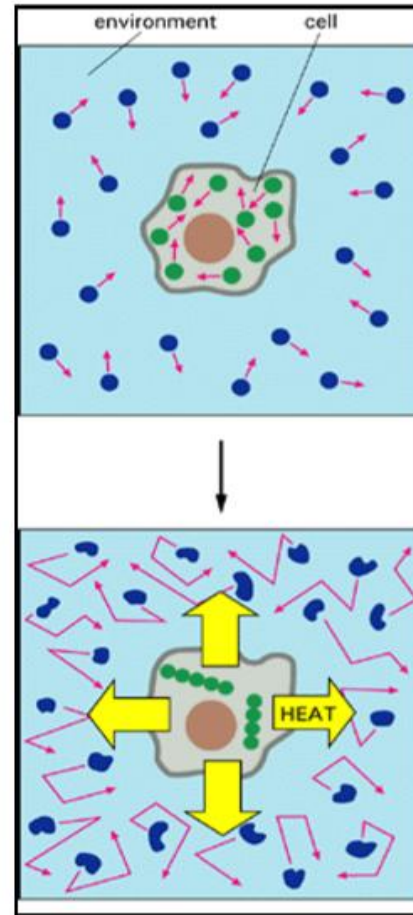
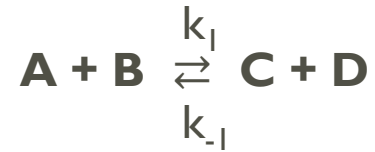


Figure 2-11. A simple thermo-dynamic analysis of a living cell. In the upper diagram, the molecules of both the cell and the rest of the universe (its environment) are depicted in a relatively disordered state. In the lower diagram, heat has been released from the cell by a reaction that orders the molecules that the cell contains (*green*). Because the heat increases the disorder in the environment around the cell, the second law of thermodynamics is satisfied as the cell grows and divides



## II. LES FORMES D'ÉNERGIE DANS LA CELLULE

### A. LES ÉNERGIES DE RÉACTION



Avec  $k_1$  et  $k_{-1}$  des constantes de vitesse

soit le quotient réactionnel :  $Q(t) = \frac{[C] \cdot [D]}{[A] \cdot [B]}$

**Enthalpie libre de réaction:**

$$\Delta rG' = \Delta rG^{\circ'} + RT \cdot \ln\left(\frac{[C] \cdot [D]}{[A] \cdot [B]}\right)$$

R : cste des gaz parfaits ( $8,314 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ )

T : T en K ( $0^\circ\text{C} = 273,15 \text{ K}$ )

' : physiologique ( $37^\circ\text{C}$ ,  $\text{pH}=7$ )

° : standard ( $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ ,  $\text{P}=1 \text{ bar}$ )

$\Delta rG^{\circ'}$  : Enthalpie libre standard de réaction si elle se faisait à  $\text{pH}=7$  avec  $[A] = [B] = [C] = [D] = 1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$

$$\Delta rG^{\circ'} = -RT \cdot \ln(K^\circ)$$

**A l'équilibre**,  $Q_{(eq)} = K^\circ$

$$\text{D'où } \Delta rG' = 0$$

Cela revient à comparer  
Q et  $K^\circ$  cf thermochimie

À l'équilibre :  
formation et  
consommation  
des produits se  
compensent

Si on augmente  $[A]$ ,  $[B]$   $\Rightarrow \Delta rG'$  diminue  $\Rightarrow$  évolution dans le sens direct

Si on augmente  $[C]$ ,  $[D]$   $\Rightarrow \Delta rG'$  augmente  $\Rightarrow$  évolution dans le sens inverse (indirect)

## II. LES FORMES D'ÉNERGIE DANS LA CELLULE

### A. LES ÉNERGIES DE RÉACTION

#### Enthalpie libre de réaction ( $\Delta rG$ )

Soit une cellule contenant :

- 10 mM de Pi
- 1mM de glucose
- 1mM de G6P

**Calculer l'enthalpie libre de réaction de l'hydrolyse du G6P.**

$$\Delta rG' = \Delta rG^{\circ'} + R.T.\ln(Q)$$

$$\Delta rG' = \Delta rG^{\circ'} + R.T.\ln([\text{Gluc}] \times [\text{Pi}] / [\text{G6P}])$$

$$\Delta rG' = \Delta rG^{\circ'} + R.T.\ln([\text{Pi}])$$

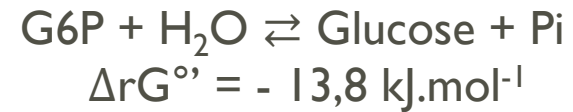
$$\Delta rG' = - 13,8 \cdot 10^3 + 8,314 \cdot (273+37) \cdot \ln(10^{-2})$$

$$\Delta rG' = - 13,8 \cdot 10^3 + 8,314 \cdot (273+37) \cdot (-2) \cdot \ln(10)$$

$$\Delta rG' = - 25,7 \text{ kJ/mol}$$

#### Données

Hydrolyse du G6P :



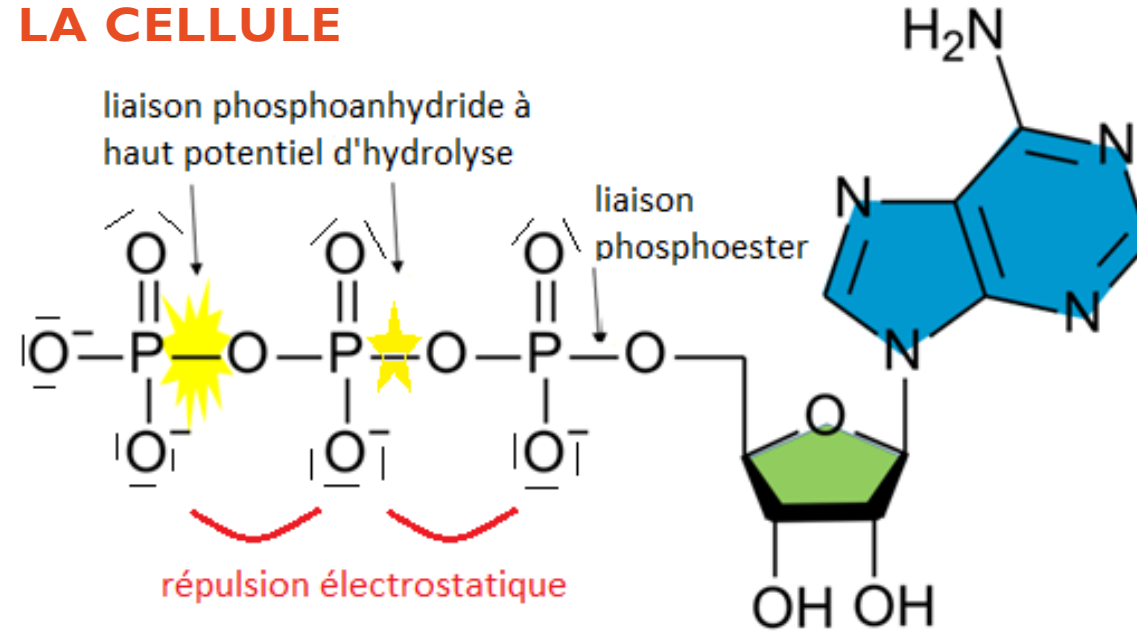
$$T = 37^\circ\text{C}$$



**Évolution dans le sens direct →**

## II. LES FORMES D'ÉNERGIE DANS LA CELLULE

### A. LES ÉNERGIES DE RÉACTION



$$\Delta_r G^{\circ} = -30,5 \text{ kJ/mol}$$

Quand on hydrolyse l'ATP, on obtient

$$\Delta_r G' = \Delta_r G^{\circ} + RT \ln \left( \frac{[\text{ADP}][\text{P}_i]}{[\text{ATP}]} \right)$$

Une cellule a toujours un excès d'ATP (sauf si stress) par rapport à ADP

$$\Rightarrow \Delta_r G' \ll -30,5 \text{ kJ/mol}$$

Dans une cellule on peut obtenir 50kJ/mol d'ATP hydrolysée

## B. LES ÉNERGIES DE GRADIENTS

### 2. Les molécules chargées



Force électrochimique, à l'équilibre,  $K^+$  dans les milieux 1 et 2:

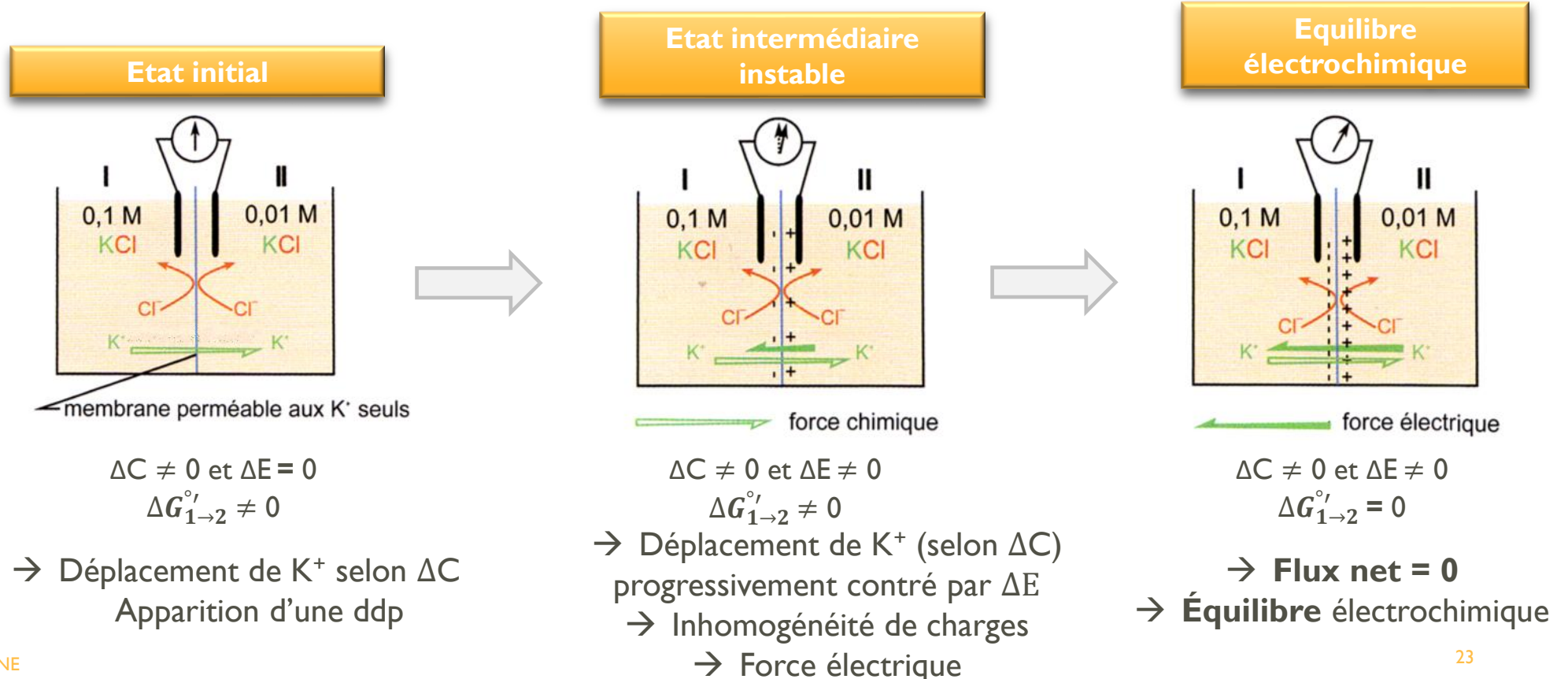
$$\Delta G_{1 \rightarrow 2}' = RT \ln \left( \frac{C_2}{C_1} \right) + z\mathcal{F}(E_2 - E_1)$$

$R$ : constante des gaz parfaits ( $8,314 \text{ J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ) et  $T$  en K

$z$ : charge de l'ion

$\mathcal{F}$ : constante de Faraday  $96\,500 \text{ C}\cdot\text{mol}^{-1}$

$\Delta E = E_2 - E_1$ : différence de potentiel électrique de part et d'autre de la mb



## B. LES ÉNERGIES DE GRADIENTS

### 2. Les molécules neutres

**Énergie de gradient** = énergie créée si une molécule neutre non chargée est de part et d'autre d'une membrane

**A l'équilibre:**

$$\Delta G'_{1 \rightarrow 2} = RT \ln\left(\frac{C_2}{C_1}\right)$$

Si glucose très concentré dans cellule, alors influx de glucose dans la cellule est exergonique

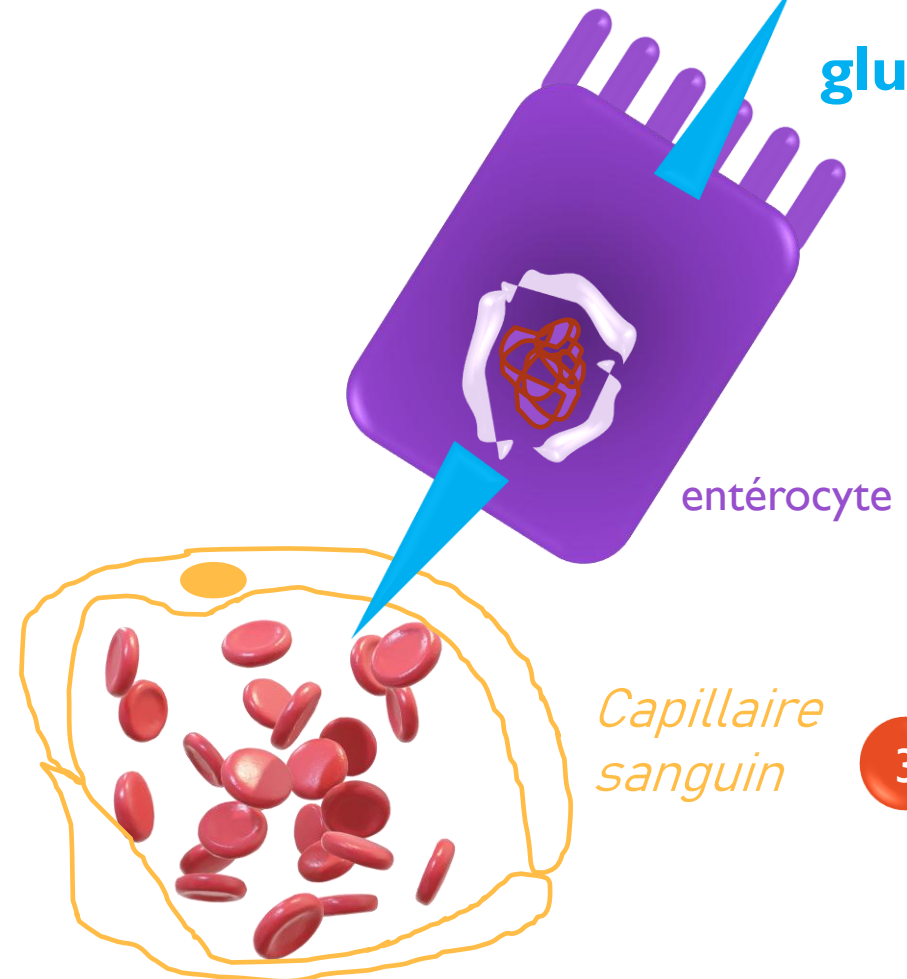
| gradient = | potentiel énergétique

Dans vos représentations, il est essentiel de faire figurer les gradients. La cellule est un système thermodynamiquement ouvert...



Lumière intestinale

glucose



entérocyte

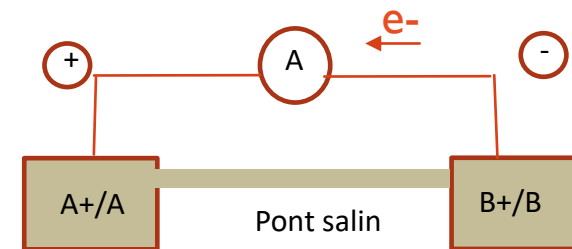
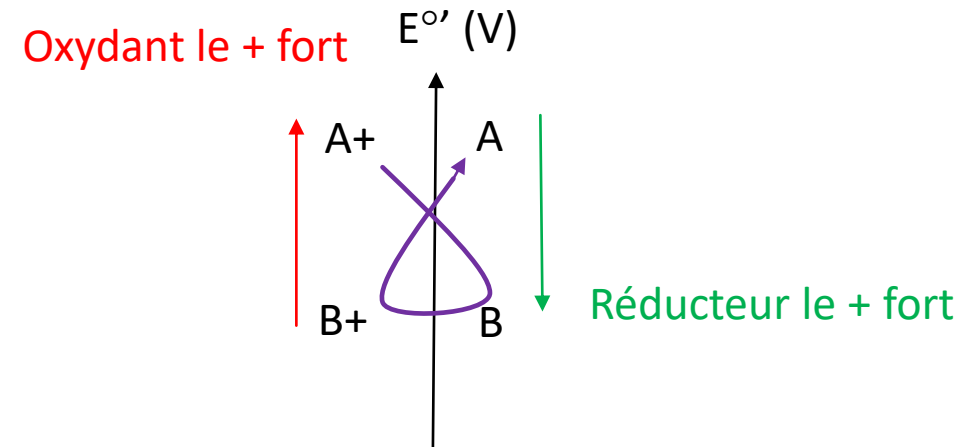
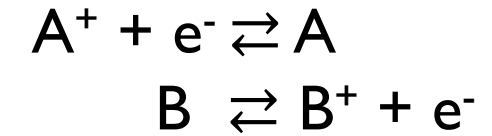
Capillaire sanguin

## C. LES ÉNERGIES D'OXYDO-RÉDUCTION

- réducteur : donneur d'e<sup>-</sup>
- oxydant : accepteur d'e<sup>-</sup>
- entre deux espèces chimiques, les e<sup>-</sup> vont toujours du réducteur le plus fort à l'oxydant le plus fort

- réactions redox se font « spontanément » dans le sens des potentiels croissants

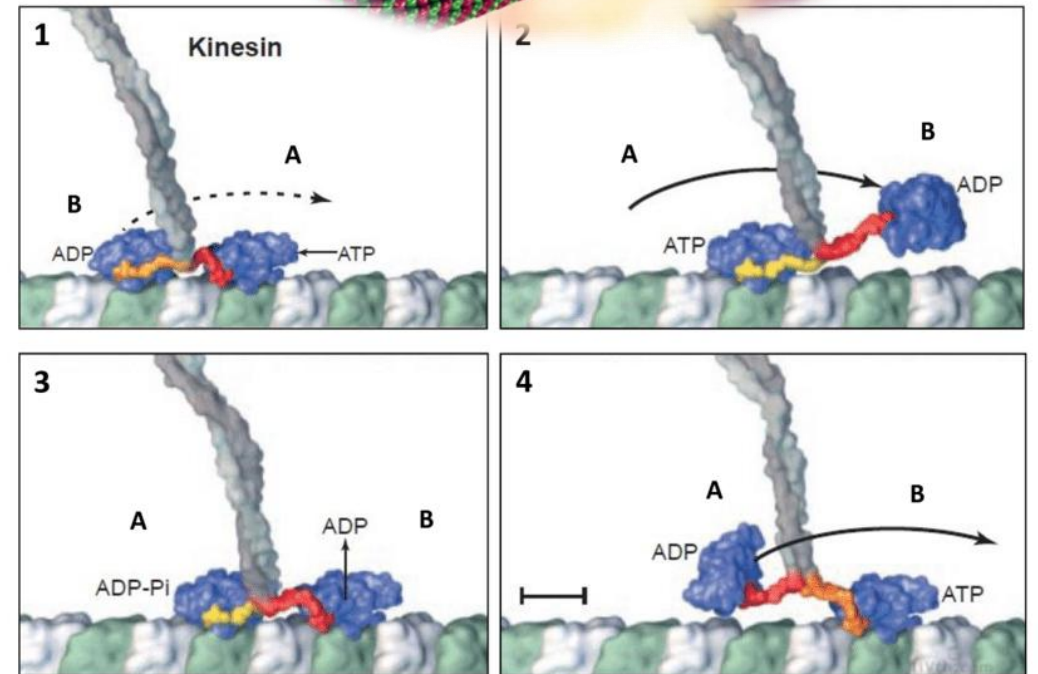
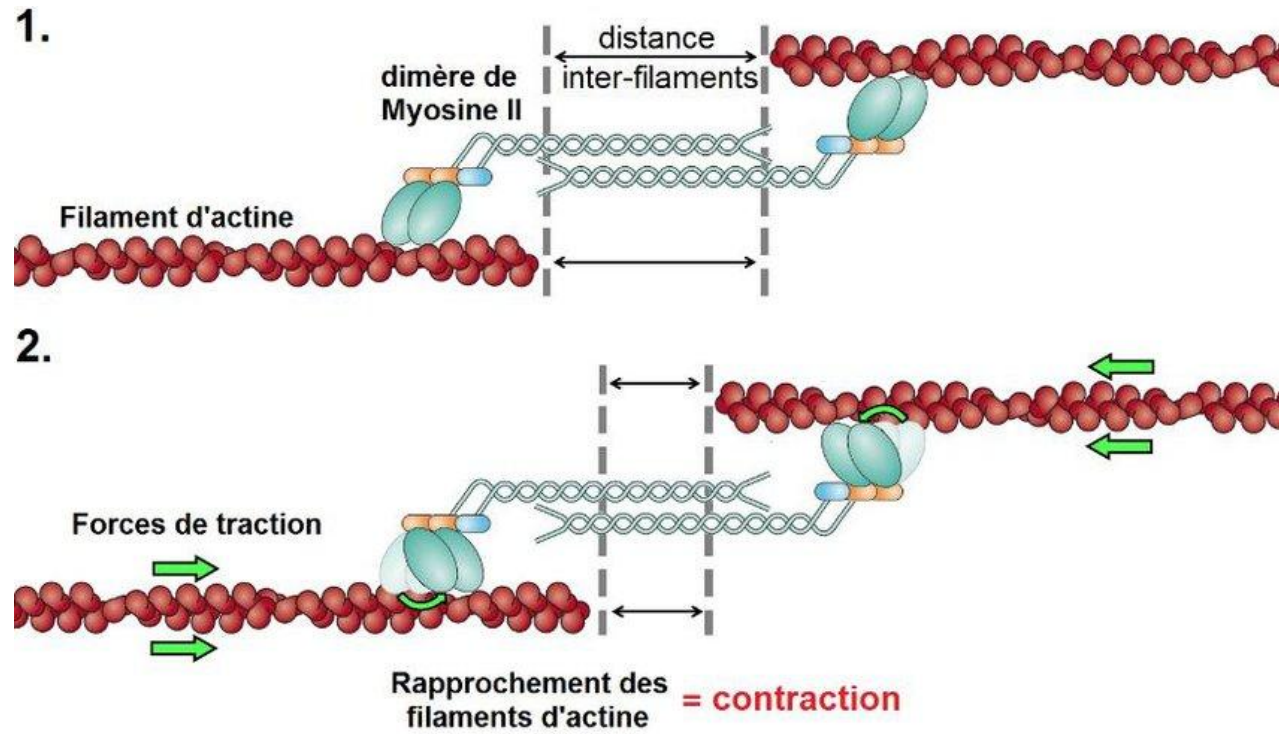
$$\Delta G^{\circ'} = -n\mathcal{F}\Delta E$$



Réaction d'oxydoréduction et énergie libérée

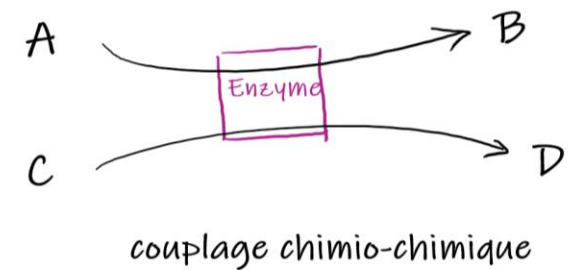
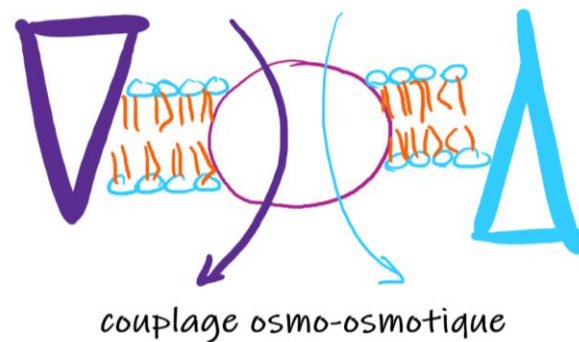
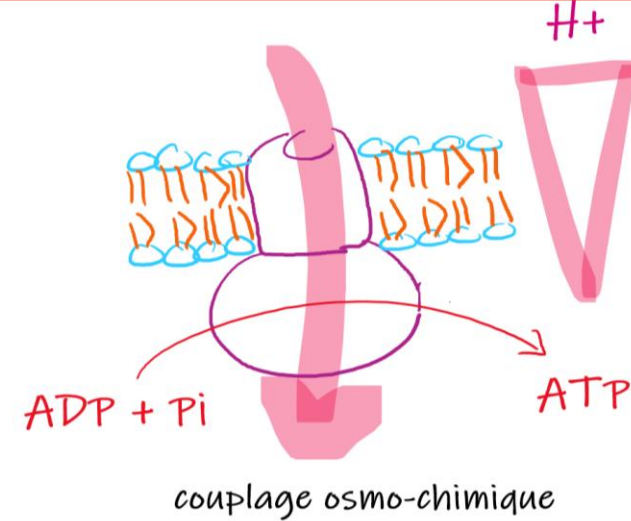
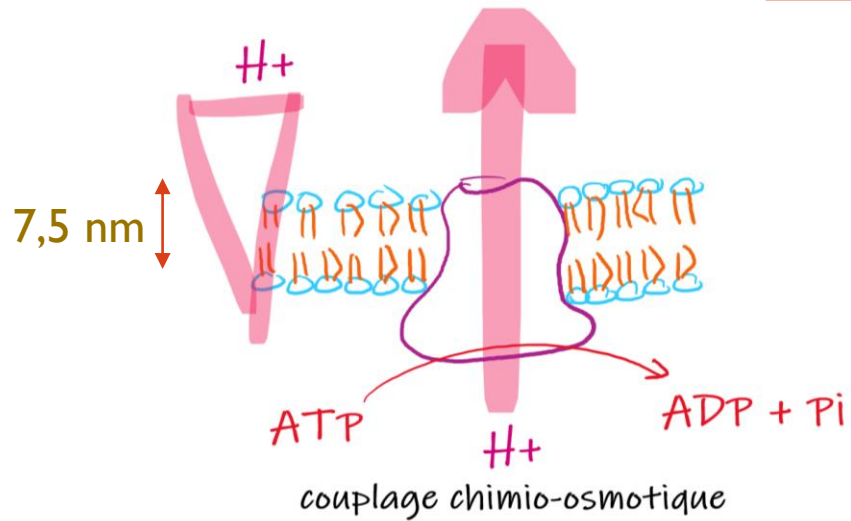
## D. L'ÉNERGIE MÉCANIQUE

$$\Delta G^{\circ'} = Em$$

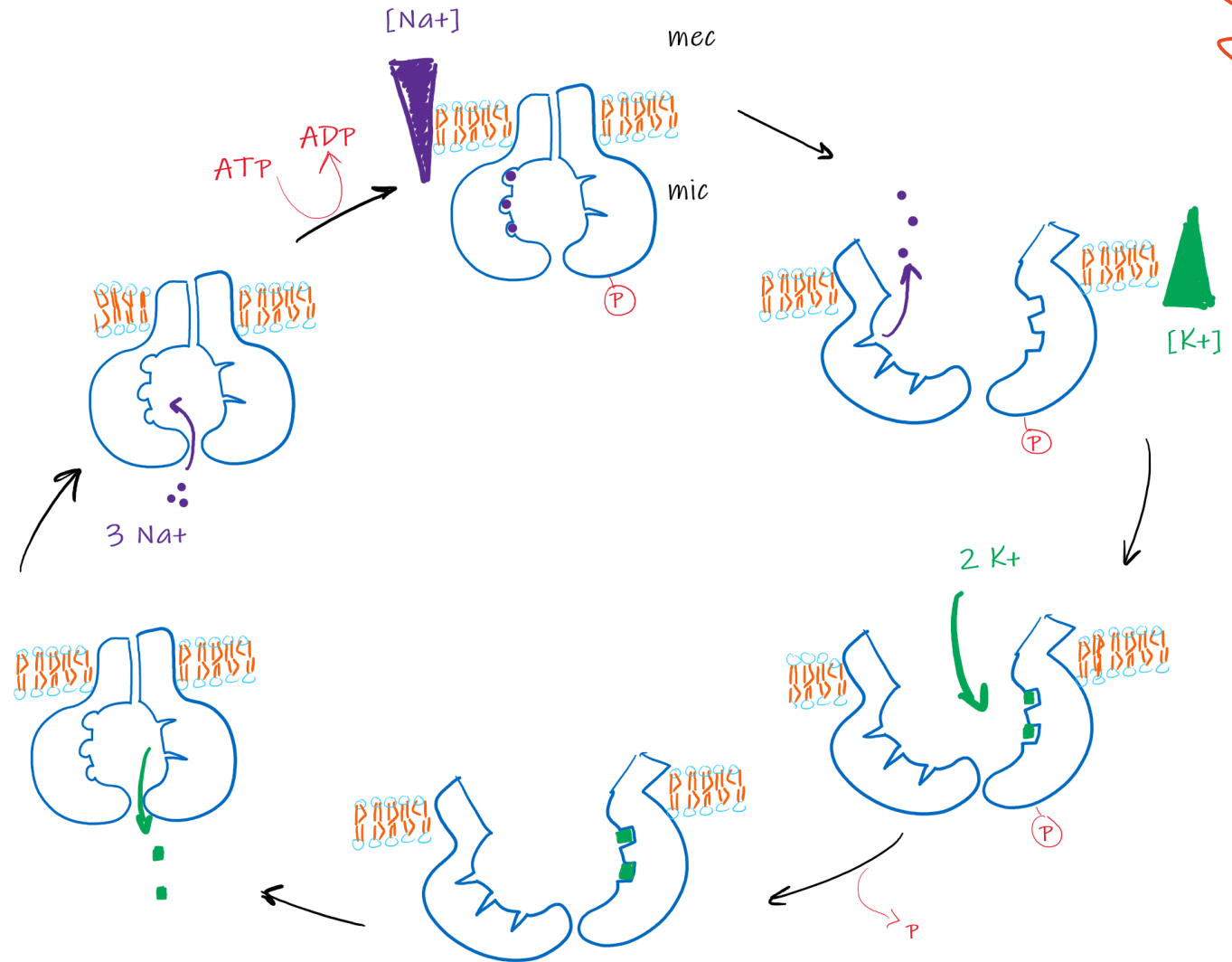
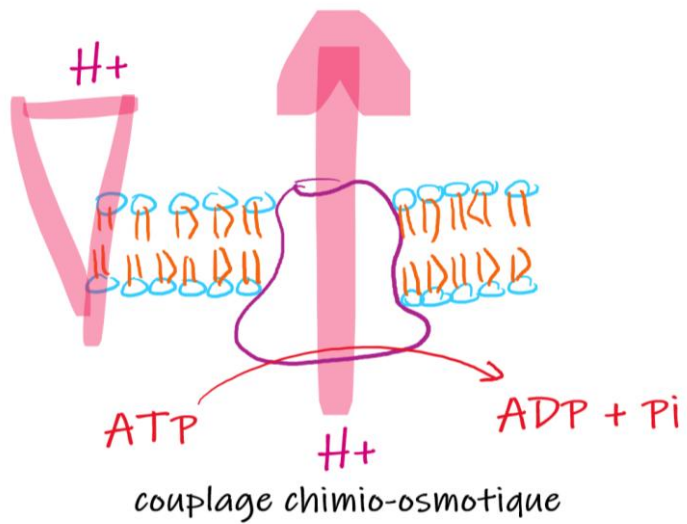


### III. LES COUPLAGES ÉNERGÉTIQUES

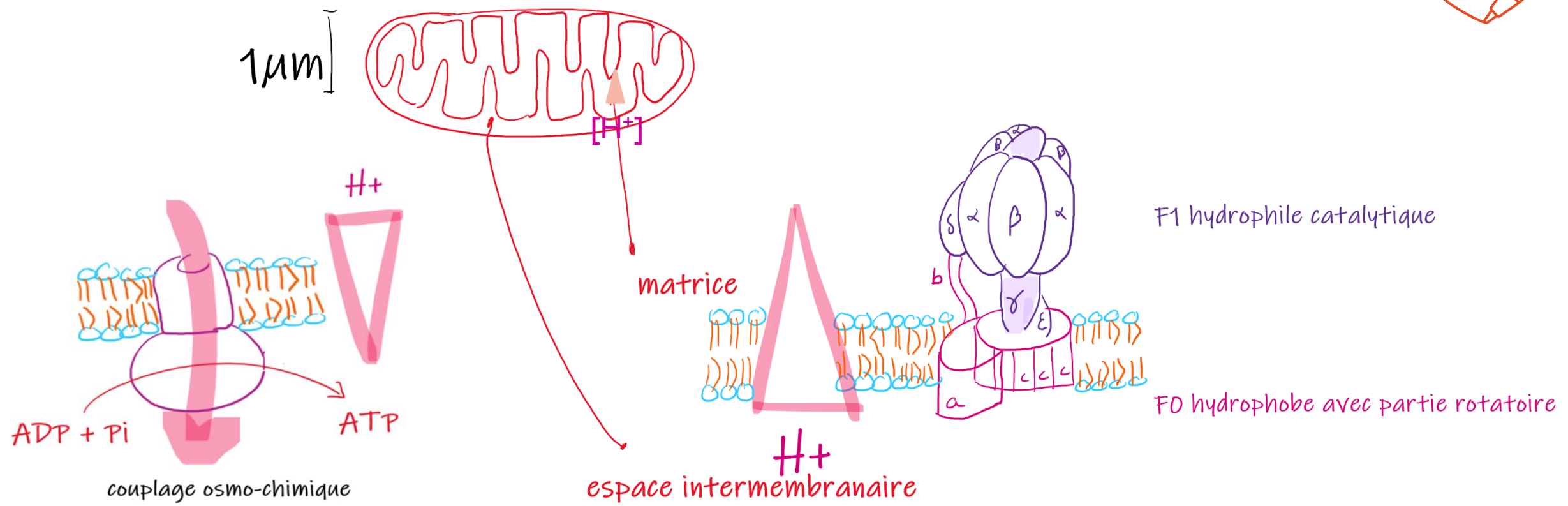
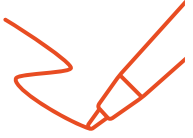
**Couplage** : (n.m.) processus par lequel l'énergie fournie par une transformation spontanée (exergonique) permet à une transformation non spontanée (endergonique) de se faire



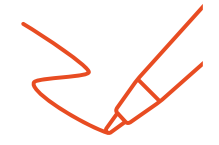
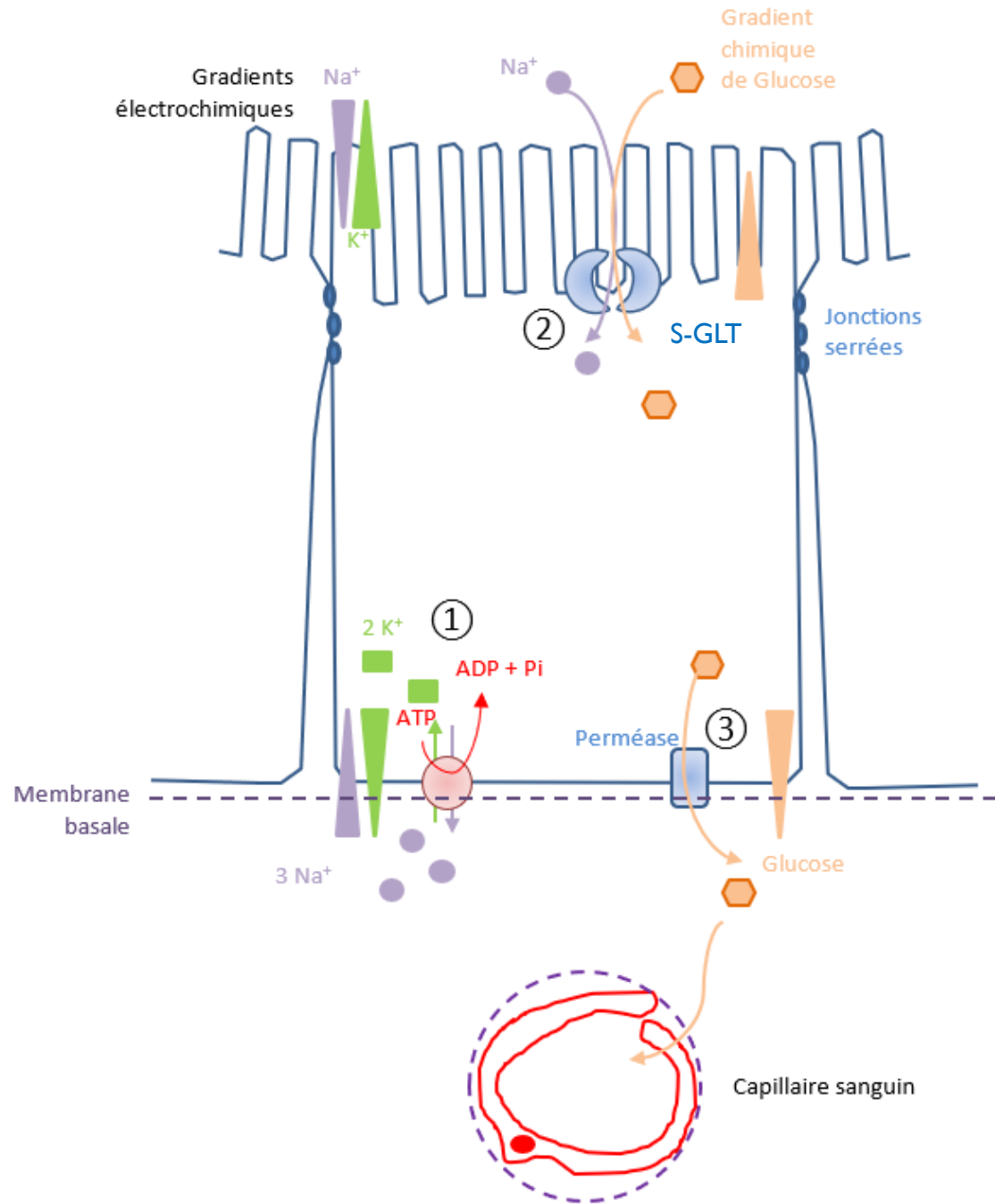
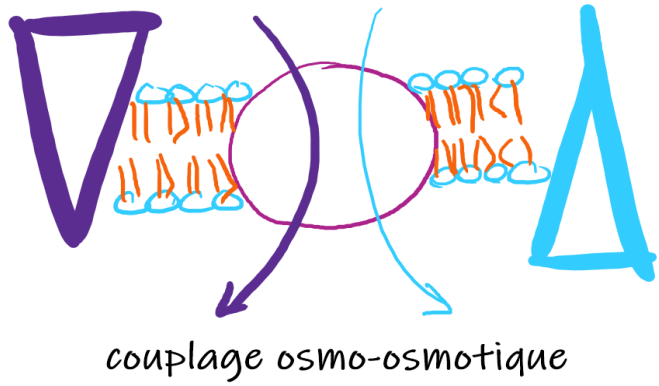
*Divers couplages rencontrés dans une cellule (S. Dalaine)*



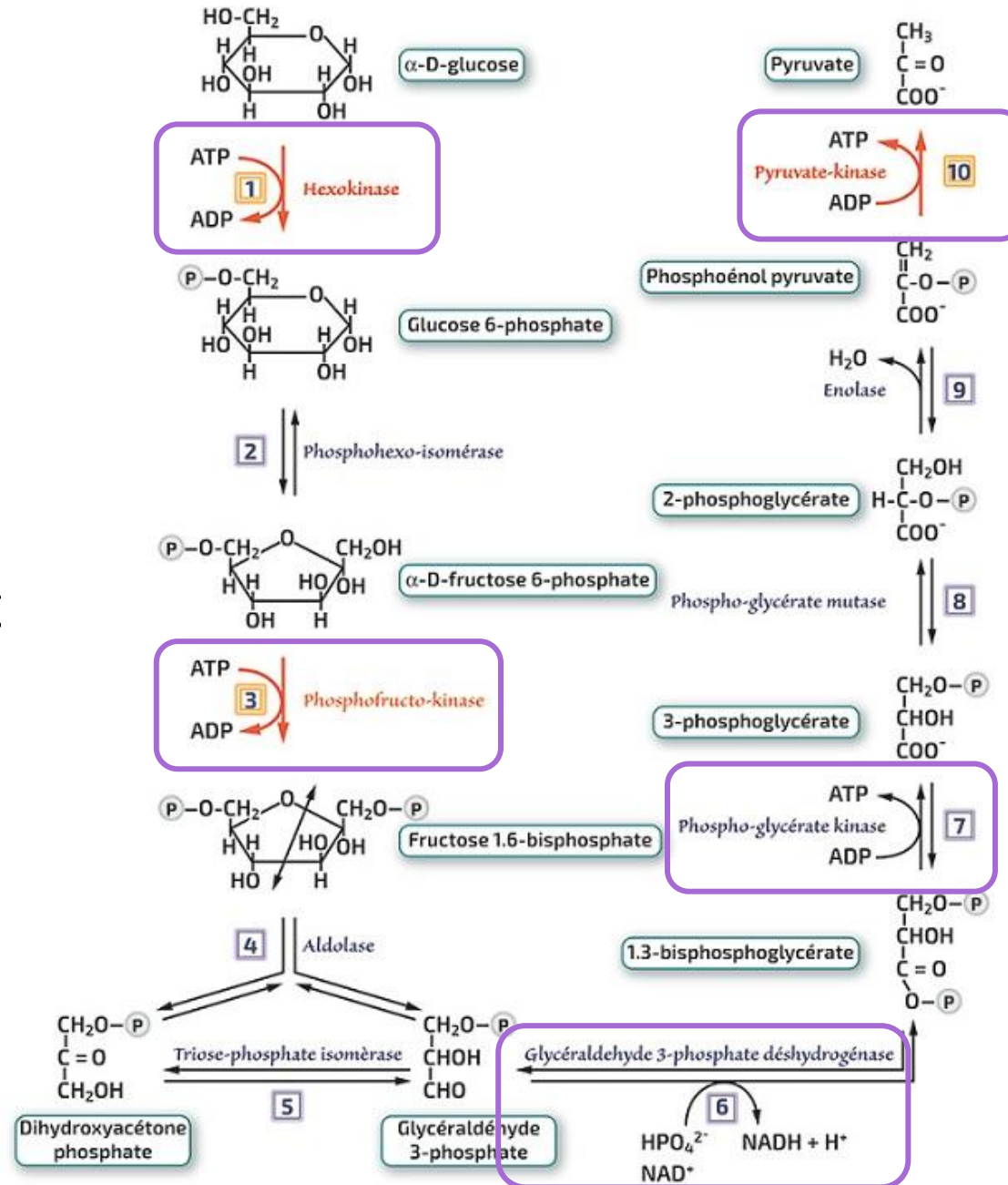
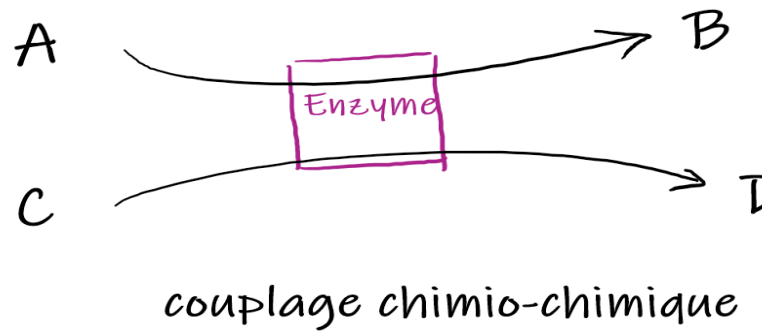
Modèle du cycle de pompage de la pompe Na/K ATP dépendante



## ATP synthétase mitochondriale (S. Dalaine)



# DEGRADATION DU GLUCOSE OU GLYCOLYSE (voie d'Embden-Meyerhof)



## E. L'ÉNERGIE DE RÉACTION PERMET DE FAIRE TOURNER UN CYCLE

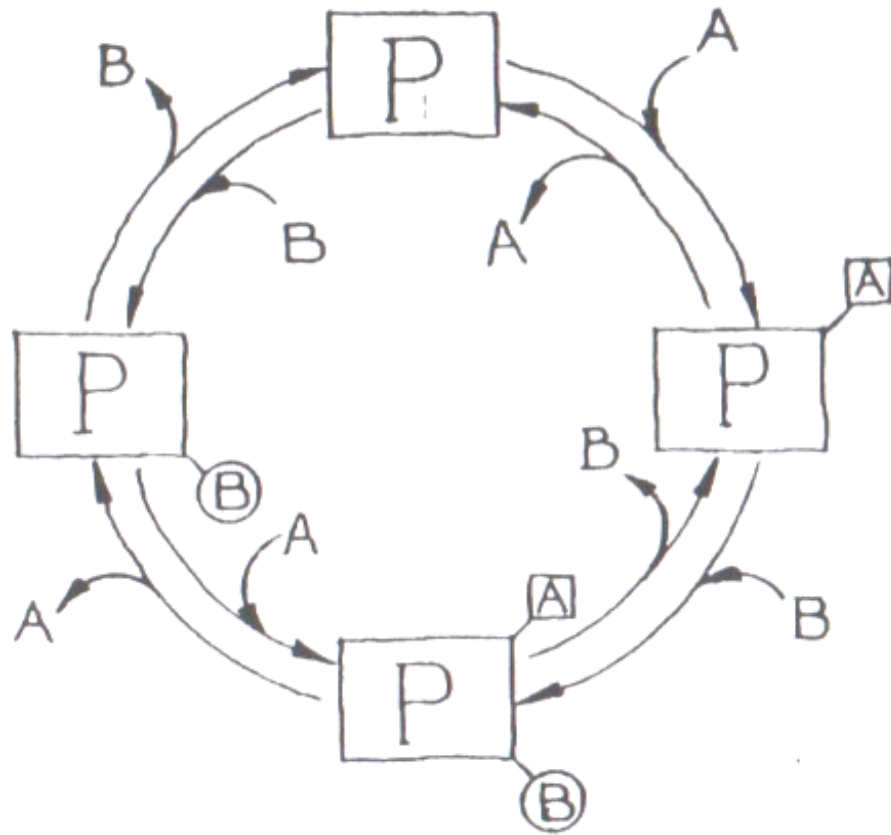


Figure 10 : processus cyclique

Comment faire  
tourner le cycle?





## Utilisation de l'énergie

Source d'énergie

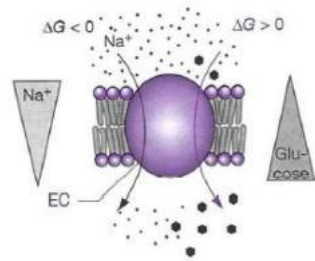
Mise en place d'un gradient osmotique défavorisé

Réalisation d'une réaction chimique défavorisée

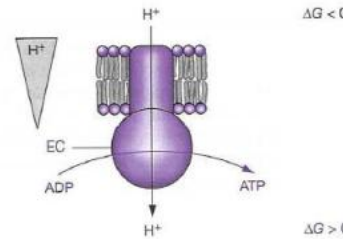
Réalisation d'un travail mécanique

Énergie osmotique

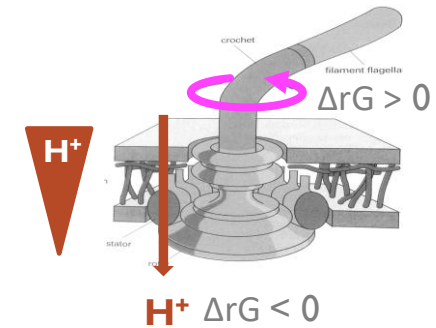
Couplage osmo-osmotique



Couplage osmo-chimique

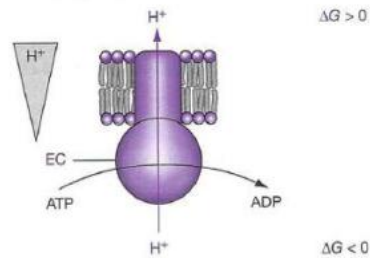


Couplage osmo-mécanique\*

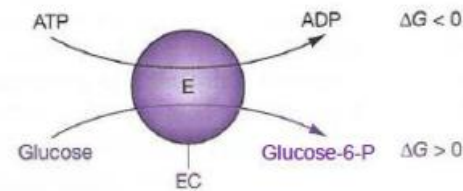


Énergie chimique

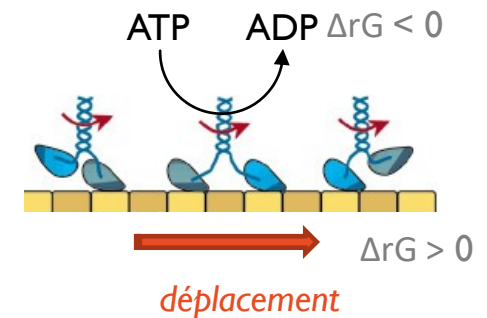
Couplage chimio-osmotique



Couplage chimio-chimique



Couplage chimio-mécanique



## SV-E-I-A Les formes d'énergie dans la cellule

### I. Les besoins énergétiques cellulaires et leur couverture par des sources énergétiques diversifiées

- A. L'organisation fonctionnelle de l'état cellulaire est indissociable d'un flux énergétique
- B. Les principes thermodynamiques

### II. Les formes d'énergie dans la cellule

- A. Les énergies de réaction
- B. Les énergies de gradients
- C. Les énergies d'oxydo-réduction
- D. L'énergie mécanique

### III. Les couplages énergétiques

- A. Couplage chimio-osmotiques
- B. Couplage osmo-chimique
- C. Couplage osmo-osmotique
- D. Couplage chimio-chimique
- E. L'énergie de réaction permet de faire tourner un cycle

## SV-E-I-B Approvisionnement et devenir des molécules

### I. L'approvisionnement et le devenir des molécules organiques ou minérales dans les cellules

- A. La MO est nécessaire au métabolisme de la cellule
- B. Les cellules hétérotrophes prélèvent la MO
- C. Les cellules autotrophes réduisent la MN prélevée en MO

### II. La photosynthèse assure la réduction des MN en convertissant l'énergie lumineuse

- A. La photosynthèse : une réduction du C minéral
- B. Le cycle de Calvin
- C. La chaîne photosynthétique
- D. La chimiosynthèse: cas de Nitrobacter

## SV-E-IC Pièce centrale des voies du métabolisme énergétique : l'ATP, un coenzyme nucléotidique de transfert de phosphoryle

### I. L'énergie d'hydrolyse d'un coenzyme nucléotidique, l'ATP

- A. Les liaisons phosphoanhydrides
- B.  $\Delta rG^{\circ}$  et  $\Delta rG'$  d'hydrolyse de l'ATP
- C. La position intermédiaire du potentiel d'hydrolyse de l'ATP

### II. De nombreuses transformations cellulaires exploitent des transferts de phosphoryle : utilisation majeure de l'ATP

- A. Des réactions de transfert de phosphoryle
- B. Le bilan sur les transferts de phosphoryle

### III. Les couplages permettant la synthèse d'ATP

- A. La formation d'ATP par transphosphorylation
- B. La formation d'ATP par conversion d'une force protomotrice

# INTRODUCTION

## Une définition de « Métabolisme » ?

Ensemble des réactions biochimiques se réalisant à vitesse élevée dans des conditions physico-chimiques compatibles avec la vie.

→ Implique transfert d'énergie et transfert de matière, intimement liés !

**Catabolisme =**

*Exemple ?*

**Anabolisme =**

*Exemple ?*

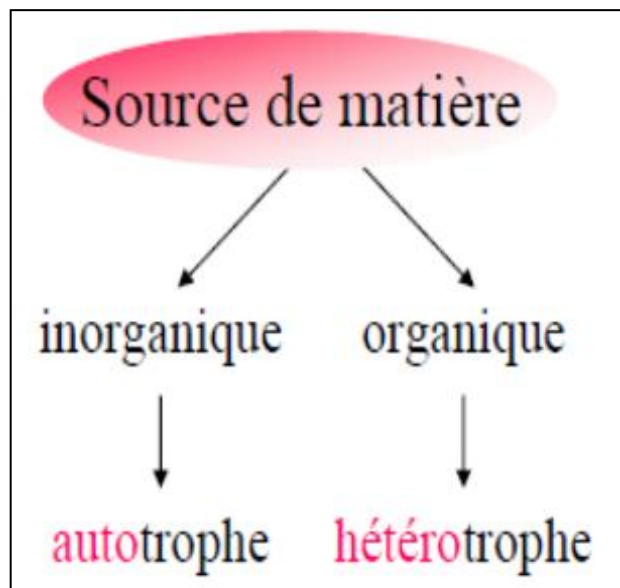


→ La biochimie métabolique résulte d'un équilibre entre dégradation (catabolisme) et synthèse (anabolique).

# INTRODUCTION

**Type trophique** : (du verbe grec *trophus*, « nourrir ») : spécifie la manière dont un être vivant constitue sa propre matière organique.

## AUTOTROPHE (Producteur primaire d'un écosystème)



Matière minérale

$H_2O$   
 $CO_2$  (carbone oxydé)  
 $HPO_4^{2-}$   
 ...

Réduction

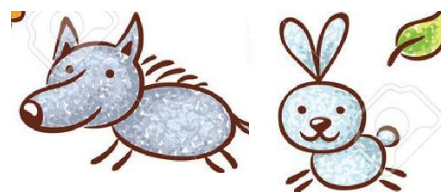
Matière organique

Ex :  $C_6H_{12}O_6$   
 (carbone réduit)

Énergie

Pouvoir réducteur

## HÉTÉROTROPHE (Producteur secondaire d'un écosystème)



Matière organique → Matière organique

# TYPES TROPHIQUES

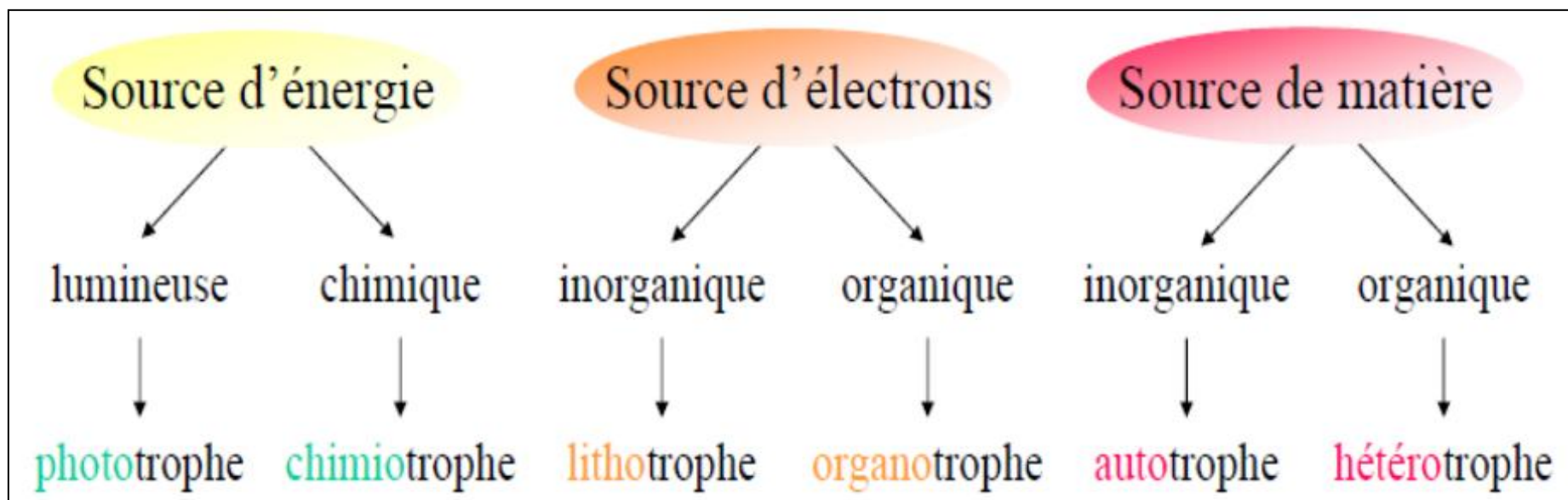
**Type trophique** : (du verbe grec *trophus*, « nourrir ») : spécifie la manière dont un être vivant constitue sa propre matière organique.

**Origine de l'énergie**

**Origine du pouvoir réducteur** (source d'électrons)

**Origine de la matière** (source de carbone)

permettent de définir différents **types trophiques**



Différents types trophiques  
Microbiologie - BELKHIRI 2019

## Toutes les combinaisons sont possibles !

Source d'énergie	Source d'électrons	Source de carbone	Type trophique
Lumière Photo-	Composé organique -organo-	Organique -hétérotrophe	Photoorganohétérotrophe
		Minérale (dioxyde de carbone) -autotrophe	Photoorganautotrophe
	Inorganique -litho <sup>-2</sup>	Organique -hétérotrophe	Photolithohétérotrophe
		Minérale (dioxyde de carbone) -autotrophe	Photolithoautotrophe
Oxydation d'un composé chimique organique ou minéral réduit Chimio-	Composé organique -organo-	Organique -hétérotrophe	Chimioorganohétérotrophe
		Minérale (dioxyde de carbone) -autotrophe	Chimioorganautotrophe
	Inorganique -litho <sup>-2</sup>	Organique -hétérotrophe	Chimiolithohétérotrophe
		Minérale (dioxyde de carbone, méthane) -autotrophe	Chimiolithoautotrophe

Différents types trophiques

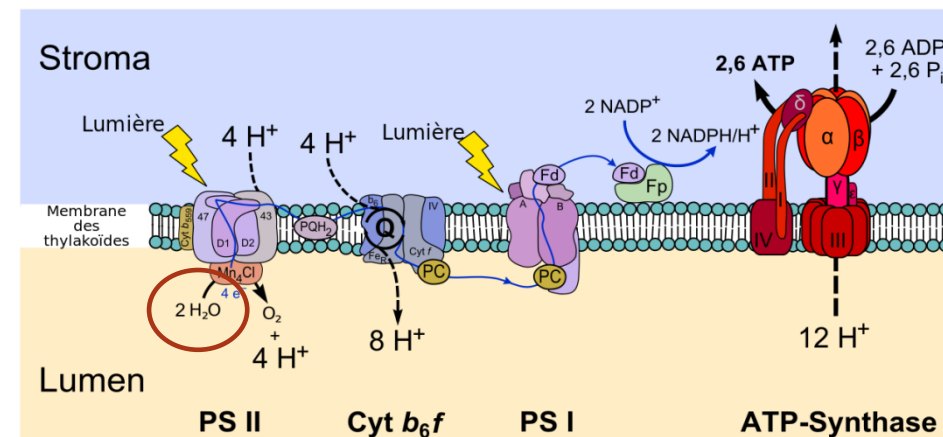
Thèse Marie-Laure PONS – ENS Lyon

## QUIZ : À quel type trophique appartient cet être vivant ?



### Coquelicot - *Papaver rhoeas* - Angiospermes

Utilise l'énergie lumineuse et de la matière minérale ( $H_2O$  du sol et  $CO_2$  de l'air) pour fabriquer ses propres glucides par photosynthèse dans les chloroplastes de ses cellules chlorophylliennes.



## Toutes les combinaisons sont possibles !

Source d'énergie	Source d'électrons	Source de carbone	Type trophique
Lumière Photo-	Composé organique -organo-	Organique -hétérotrophe	Photoorganohétérotrophe
		Minérale (dioxyde de carbone) -autotrophe	Photoorganoautotrophe
	Inorganique -litho <sup>-2</sup>	Organique -hétérotrophe	Photolithohétérotrophe
		Minérale (dioxyde de carbone) -autotrophe	Photolithoautotrophe
Oxydation d'un composé chimique organique ou minéral réduit Chimio-	Composé organique -organo-	Organique -hétérotrophe	Chimioorganohétérotrophe
		Minérale (dioxyde de carbone) -autotrophe	Chimioorganoautotrophe
	Inorganique -litho <sup>-2</sup>	Organique -hétérotrophe	Chimiolithohétérotrophe
		Minérale (dioxyde de carbone, méthane) -autotrophe	Chimiolithoautotrophe

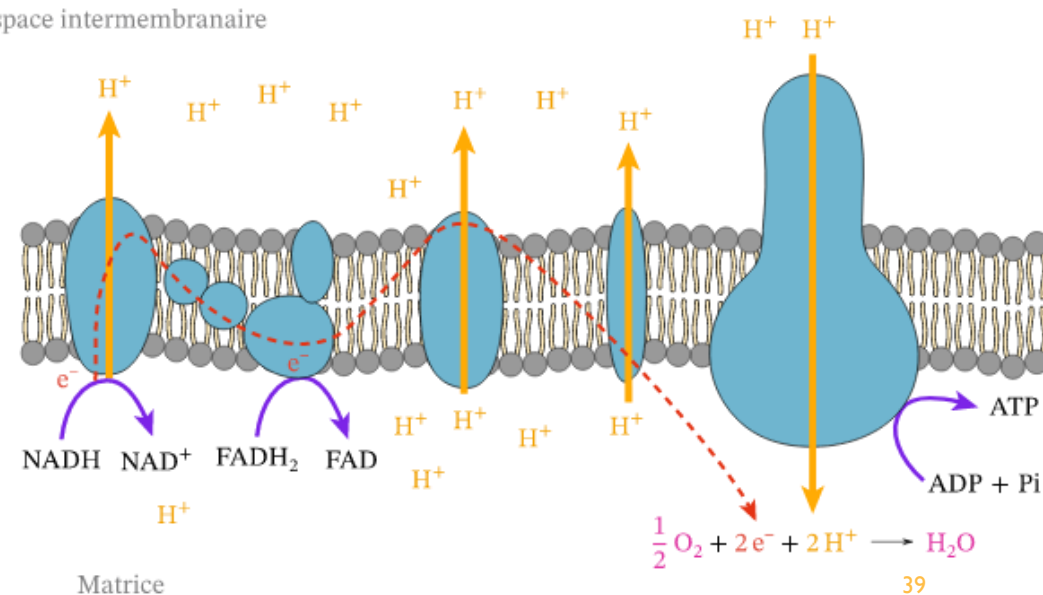
## Différents types trophiques

Thèse Marie-Laure PONS – ENS Lyon

## QUIZ : À quel type trophique appartient cet être vivant ?



Espace intermembranaire



## Toutes les combinaisons sont possibles !

Source d'énergie	Source d'électrons	Source de carbone	Type trophique
Lumière <i>Photo-</i>	Composé organique <i>-organo-</i>	Organique <i>-hétérotrophe</i>	<b>Photo</b> organohétérotrophe
		Minérale (dioxyde de carbone) <i>-autotrophe</i>	<b>Photo</b> organoauteurrophe
	Inorganique <i>-litho<sup>-2</sup></i>	Organique <i>-hétérotrophe</i>	<b>Photo</b> lithohétérotrophe
		Minérale (dioxyde de carbone) <i>-autotrophe</i>	<b>Photo</b> lithoauteurrophe
Oxydation d'un composé chimique organique ou minéral réduit <i>Chimio-</i>	Composé organique <i>-organo-</i>	Organique <i>-hétérotrophe</i>	<b>Chimio</b> organohétérotrophe
		Minérale (dioxyde de carbone) <i>-autotrophe</i>	<b>Chimio</b> organoauteurrophe
	Inorganique <i>-litho<sup>-2</sup></i>	Organique <i>-hétérotrophe</i>	<b>Chimio</b> lithohétérotrophe
		Minérale (dioxyde de carbone, méthane) <i>-autotrophe</i>	<b>Chimio</b> lithoauteurrophe

Différents types trophiques

Thèse Marie-Laure PONS – ENS Lyon

## QUIZ : À quel type trophique appartient cet être vivant ?



Le ver sous-marin Riftia est dépourvu de système digestif, mais son organisme héberge des **bactéries symbiotiques sulfuroxydantes** qui utilisent les molécules de sulfure d'hydrogène ( $H_2S$ ) émises par les fumeurs noirs, du dioxyde de carbone ( $CO_2$ ) et du dioxygène ( $O_2$ ) dissous pour synthétiser des sucres que le ver peut assimiler.

## SV-E-I-A Les formes d'énergie dans la cellule

### I. Les besoins énergétiques cellulaires et leur couverture par des sources énergétiques diversifiées

- A. L'organisation fonctionnelle de l'état cellulaire est indissociable d'un flux énergétique
- B. Les principes thermodynamiques

### II. Les formes d'énergie dans la cellule

- A. Les énergies de réaction
- B. Les énergies de gradients
- C. Les énergies d'oxydo-réduction
- D. L'énergie mécanique

### III. Les couplages énergétiques

- A. Couplage chimio-osmotiques
- B. Couplage osmo-chimique
- C. Couplage osmo-osmotique
- D. Couplage chimio-chimique
- E. L'énergie de réaction permet de faire tourner un cycle

## SV-E-I-B Approvisionnement et devenir des molécules

### I. L'approvisionnement et le devenir des molécules organiques ou minérales dans les cellules

- A. La MO est nécessaire au métabolisme de la cellule
- B. Les cellules hétérotrophes prélèvent la MO
- C. Les cellules autotrophes réduisent la MN prélevée en MO

### II. La photosynthèse assure la réduction des MN en convertissant l'énergie lumineuse

- A. La photosynthèse : une réduction du C minéral
- B. Le cycle de Calvin
- C. La chaîne photosynthétique
- D. La chimiosynthèse: cas de Nitrobacter

## SV-E-IC Pièce centrale des voies du métabolisme énergétique : l'ATP, un coenzyme nucléotidique de transfert de phosphoryle

### I. L'énergie d'hydrolyse d'un coenzyme nucléotidique, l'ATP

- A. Les liaisons phosphoanhydrides
- B.  $\Delta rG^{\circ}$  et  $\Delta rG'$  d'hydrolyse de l'ATP
- C. La position intermédiaire du potentiel d'hydrolyse de l'ATP

### II. De nombreuses transformations cellulaires exploitent des transferts de phosphoryle : utilisation majeure de l'ATP

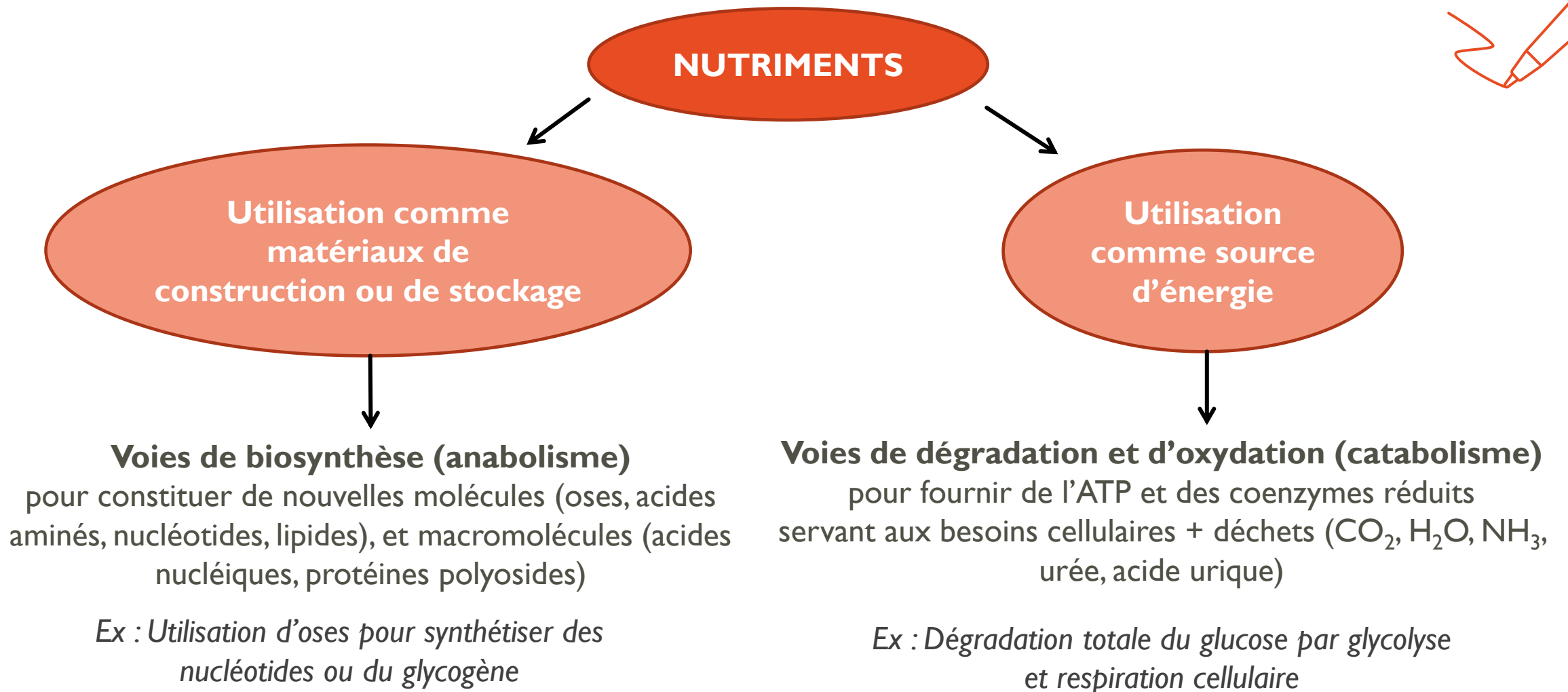
- A. Des réactions de transfert de phosphoryle
- B. Le bilan sur les transferts de phosphoryle

### III. Les couplages permettant la synthèse d'ATP

- A. La formation d'ATP par transphosphorylation
- B. La formation d'ATP par conversion d'une force protomotrice

# I- L'APPROVISIONNEMENT ET LE DEVENIR DES MOLECULES ORGANIQUES OU MINERALES DANS LES CELLULES

## A. LA MATIERE ORGANIQUE EST NECESSAIRE AU METABOLISME DE LA CELLULE



## SV-E-I-A Les formes d'énergie dans la cellule

### I. Les besoins énergétiques cellulaires et leur couverture par des sources énergétiques diversifiées

- A. L'organisation fonctionnelle de l'état cellulaire est indissociable d'un flux énergétique
- B. Les principes thermodynamiques

### II. Les formes d'énergie dans la cellule

- A. Les énergies de réaction
- B. Les énergies de gradients
- C. Les énergies d'oxydo-réduction
- D. L'énergie mécanique

### III. Les couplages énergétiques

- A. Couplage chimio-osmotiques
- B. Couplage osmo-chimique
- C. Couplage osmo-osmotique
- D. Couplage chimio-chimique
- E. L'énergie de réaction permet de faire tourner un cycle

## SV-E-I-B Approvisionnement et devenir des molécules

### I. L'approvisionnement et le devenir des molécules organiques ou minérales dans les cellules

- A. La MO est nécessaire au métabolisme de la cellule
- B. Les cellules hétérotrophes prélèvent la MO
- C. Les cellules autotrophes réduisent la MN prélevée en MO

### II. La photosynthèse assure la réduction des MN en convertissant l'énergie lumineuse

- A. La photosynthèse : une réduction du C minéral
- B. Le cycle de Calvin
- C. La chaîne photosynthétique
- D. La chimiosynthèse: cas de Nitrobacter

## SV-E-IC Pièce centrale des voies du métabolisme énergétique : l'ATP, un coenzyme nucléotidique de transfert de phosphoryle

### I. L'énergie d'hydrolyse d'un coenzyme nucléotidique, l'ATP

- A. Les liaisons phosphoanhydrides
- B.  $\Delta rG^{\circ}$  et  $\Delta rG'$  d'hydrolyse de l'ATP
- C. La position intermédiaire du potentiel d'hydrolyse de l'ATP

### II. De nombreuses transformations cellulaires exploitent des transferts de phosphoryle : utilisation majeure de l'ATP

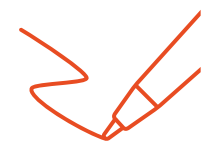
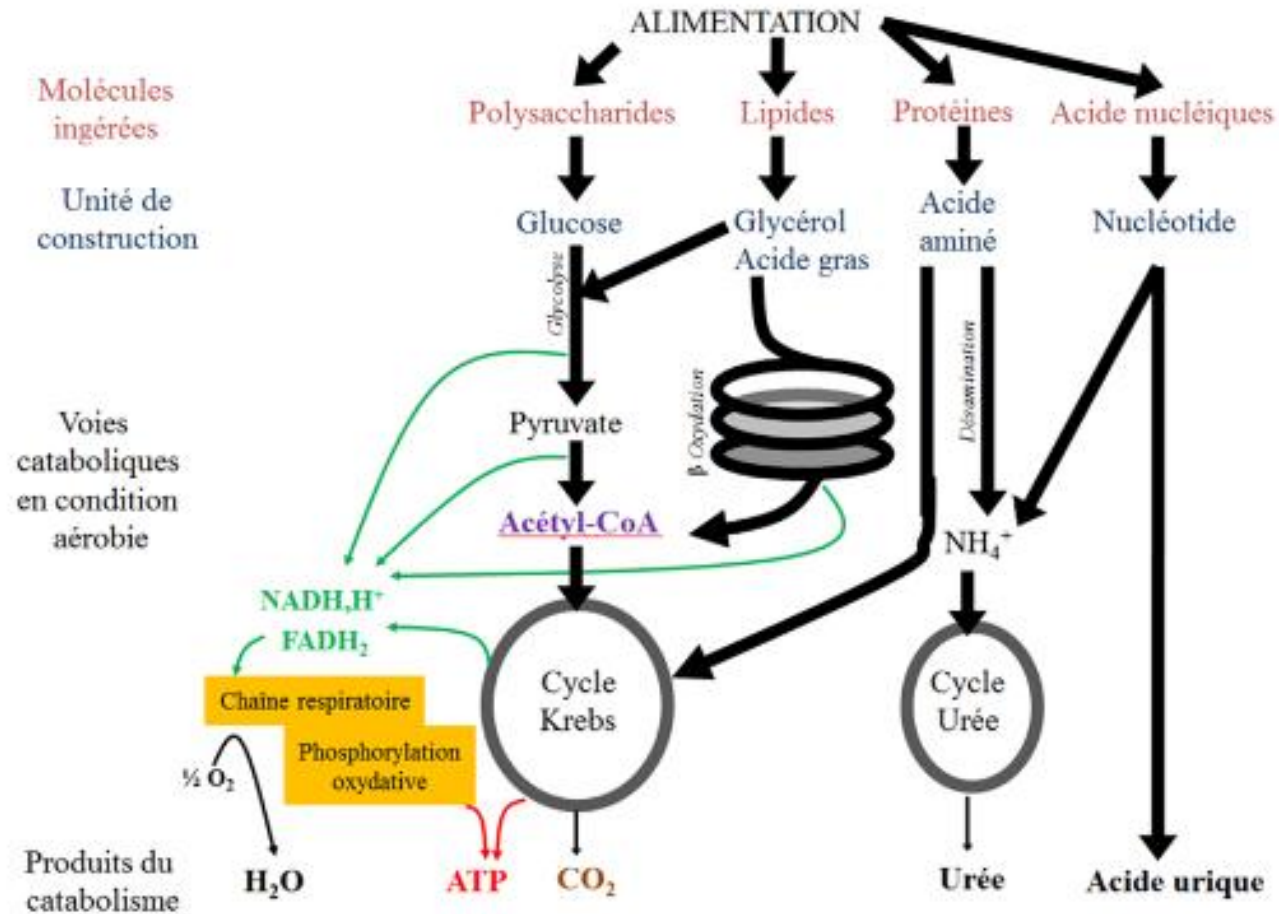
- A. Des réactions de transfert de phosphoryle
- B. Le bilan sur les transferts de phosphoryle

### III. Les couplages permettant la synthèse d'ATP

- A. La formation d'ATP par transphosphorylation
- B. La formation d'ATP par conversion d'une force protomotrice

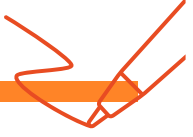
# I- L'APPROVISIONNEMENT ET LE DEVENIR DES MOLECULES ORGANIQUES OU MINERALES DANS LES CELLULES

## A. LA MATIERE ORGANIQUE EST NECESSAIRE AU METABOLISME DE LA CELLULE



Voies de dégradation et d'oxydation (catabolisme) pour fournir de l'ATP et des coenzymes réduits servant aux besoins cellulaires + déchets ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{NH}_3$ , urée, acide urique)

*Le catabolisme fournit énergie, pouvoir réducteur et déchets*



## B. LES CELLULES HETEROTROPHES PRELEVENT LA MO DANS LEUR ENVIRONNEMENT

- Les Métazoaires incapables de produire leur énergie à partir de la lumière ou de molécules minérales
- ⇒ prélèvement de MO via alimentation et dégradation des molécules sous forme d'unités de construction cellulaire comme le glucose, les acides gras, les acides aminés, les nucléotides.



Digestion chimique et mécanique => dégradation sous forme d'unités de construction

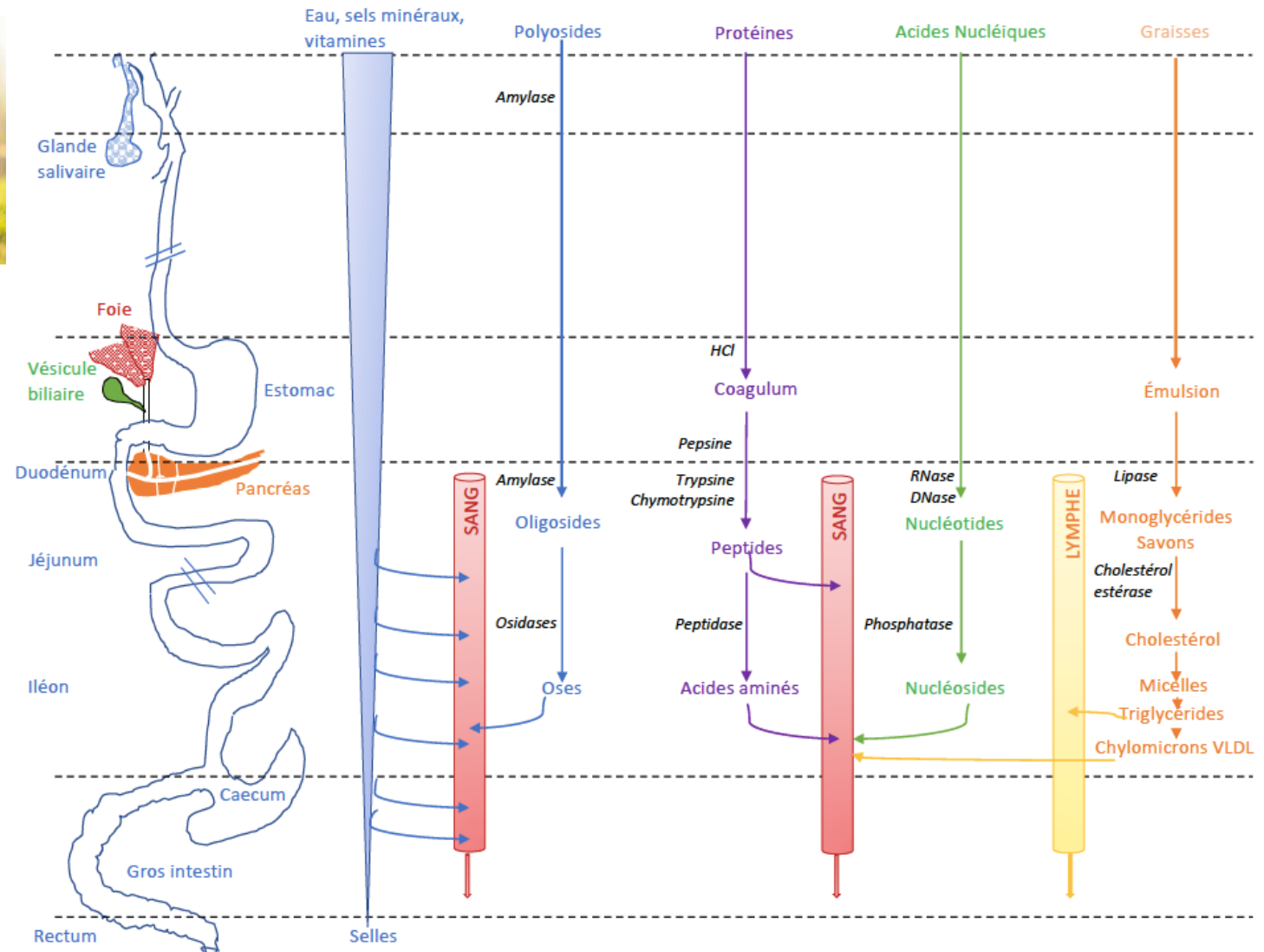
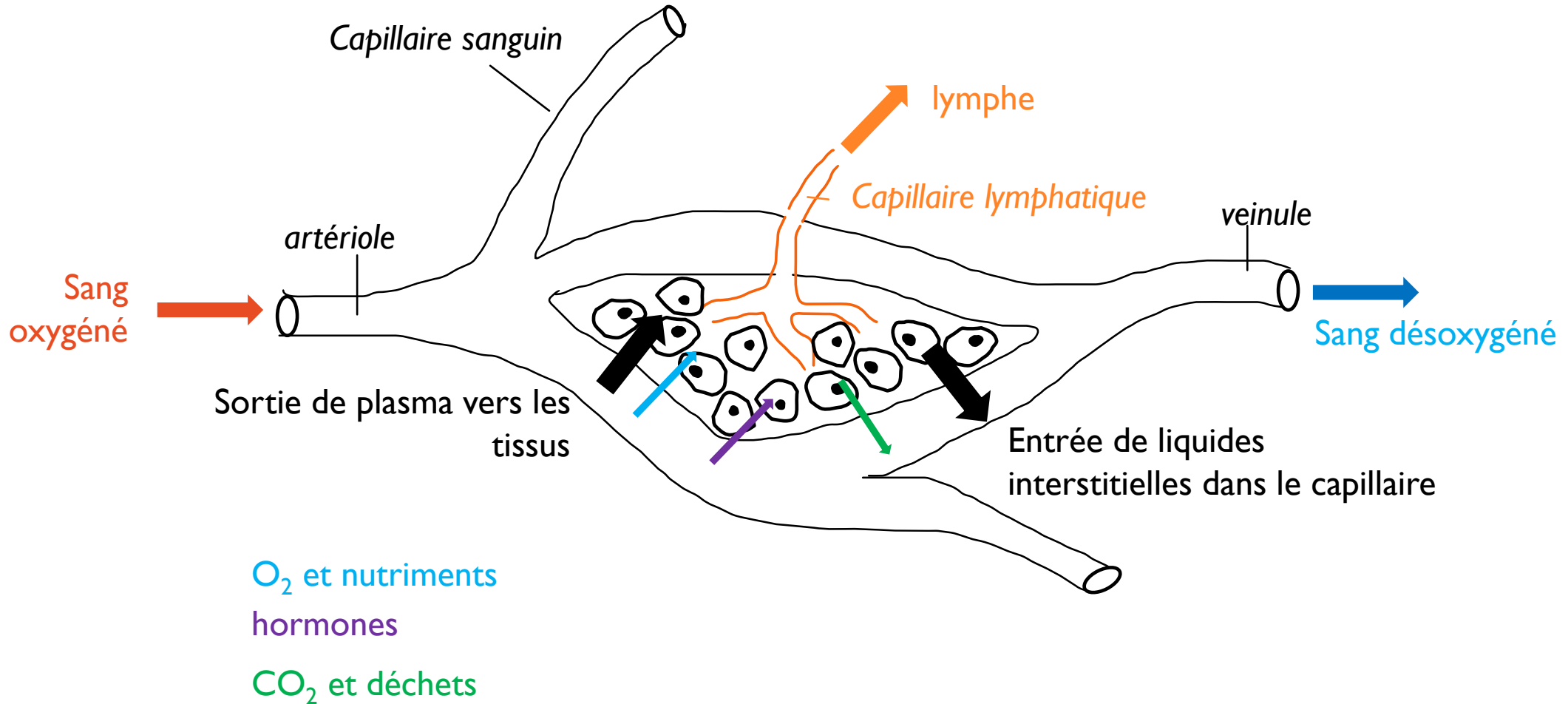
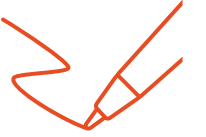


Schéma de la digestion chimique des molécules ingérées, ex de la souris (S. Dalaine)

# I- L'APPROVISIONNEMENT ET LE DEVENIR DES MOLECULES ORGANIQUES OU MINERALES DANS LES CELLULES

## B. LES CELLULES HETEROTROPHES PRELEVENT LA MO DANS LEUR ENVIRONNEMENT



*L'approvisionnement des cellules en matière organique se fait au niveau des champs capillaires (S. Dalaine)*

# I- L'APPROVISIONNEMENT ET LE DEVENIR DES MOLECULES ORGANIQUES OU MINERALES DANS LES CELLULES

## B. LES CELLULES HETEROTROPHES PRELEVENT LA MO DANS LEUR ENVIRONNEMENT

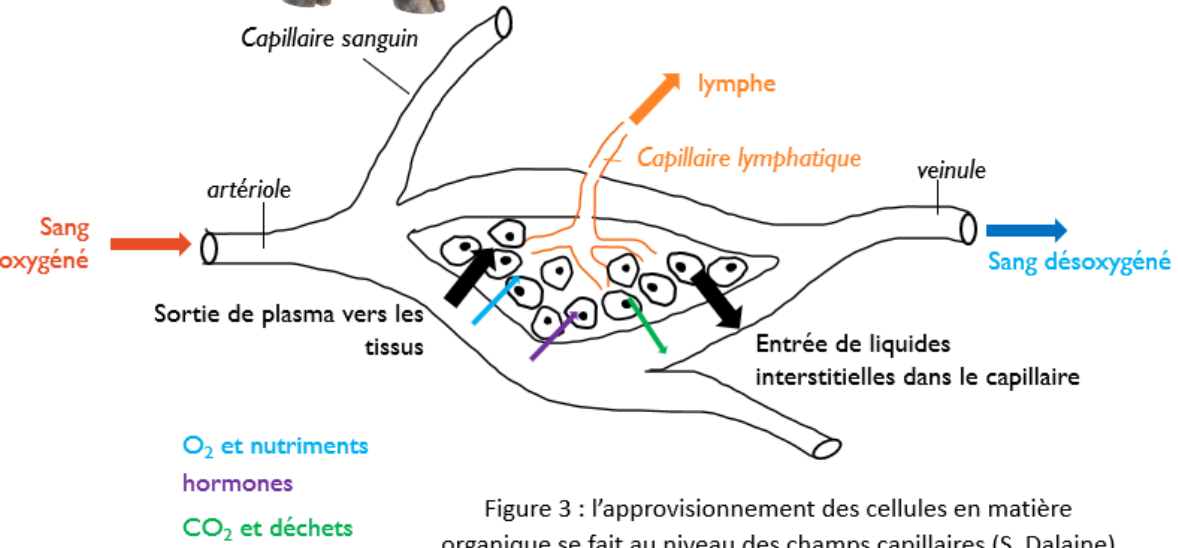
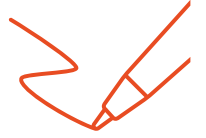
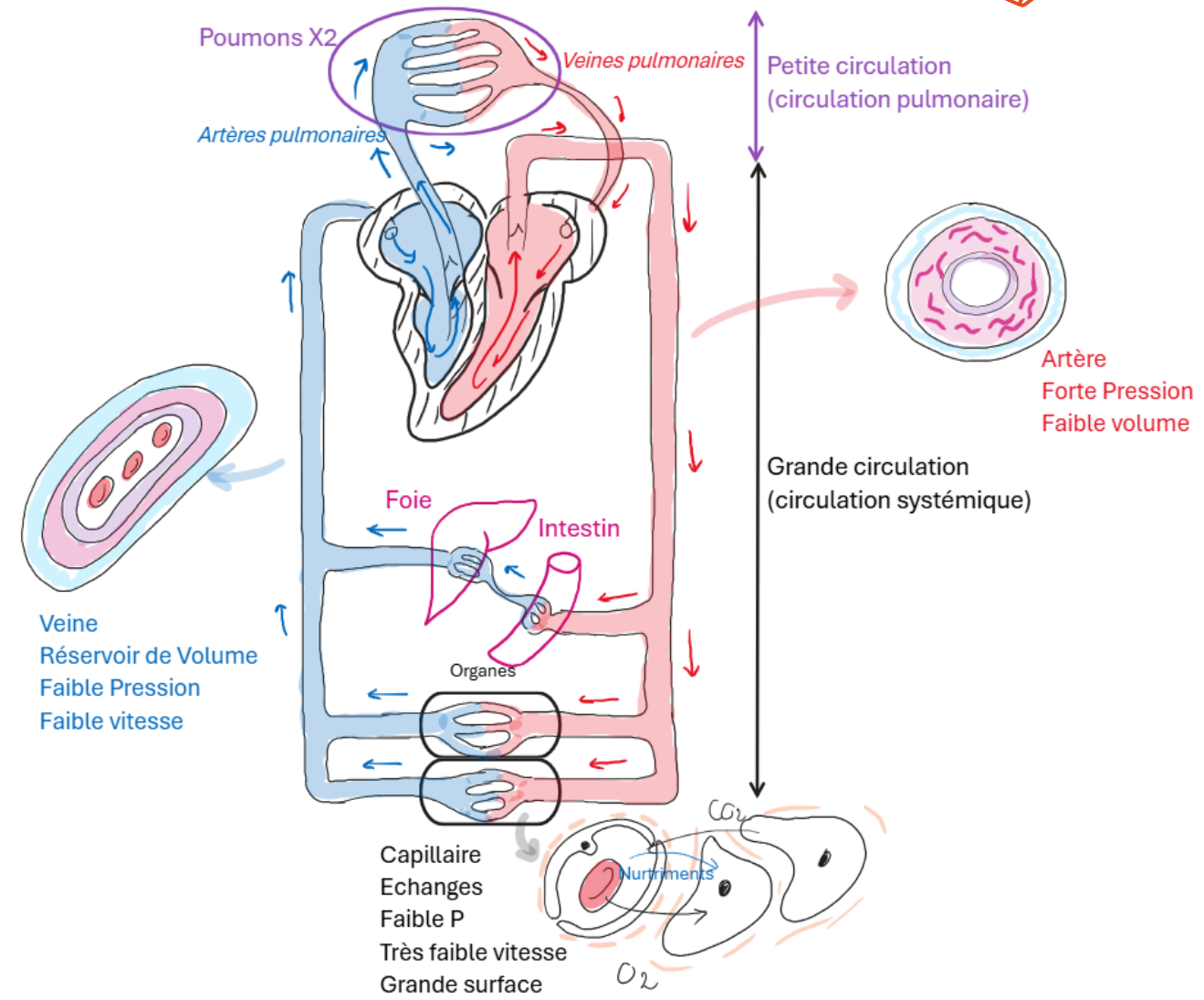


Figure 3 : l'approvisionnement des cellules en matière organique se fait au niveau des champs capillaires (S. Dalaine)



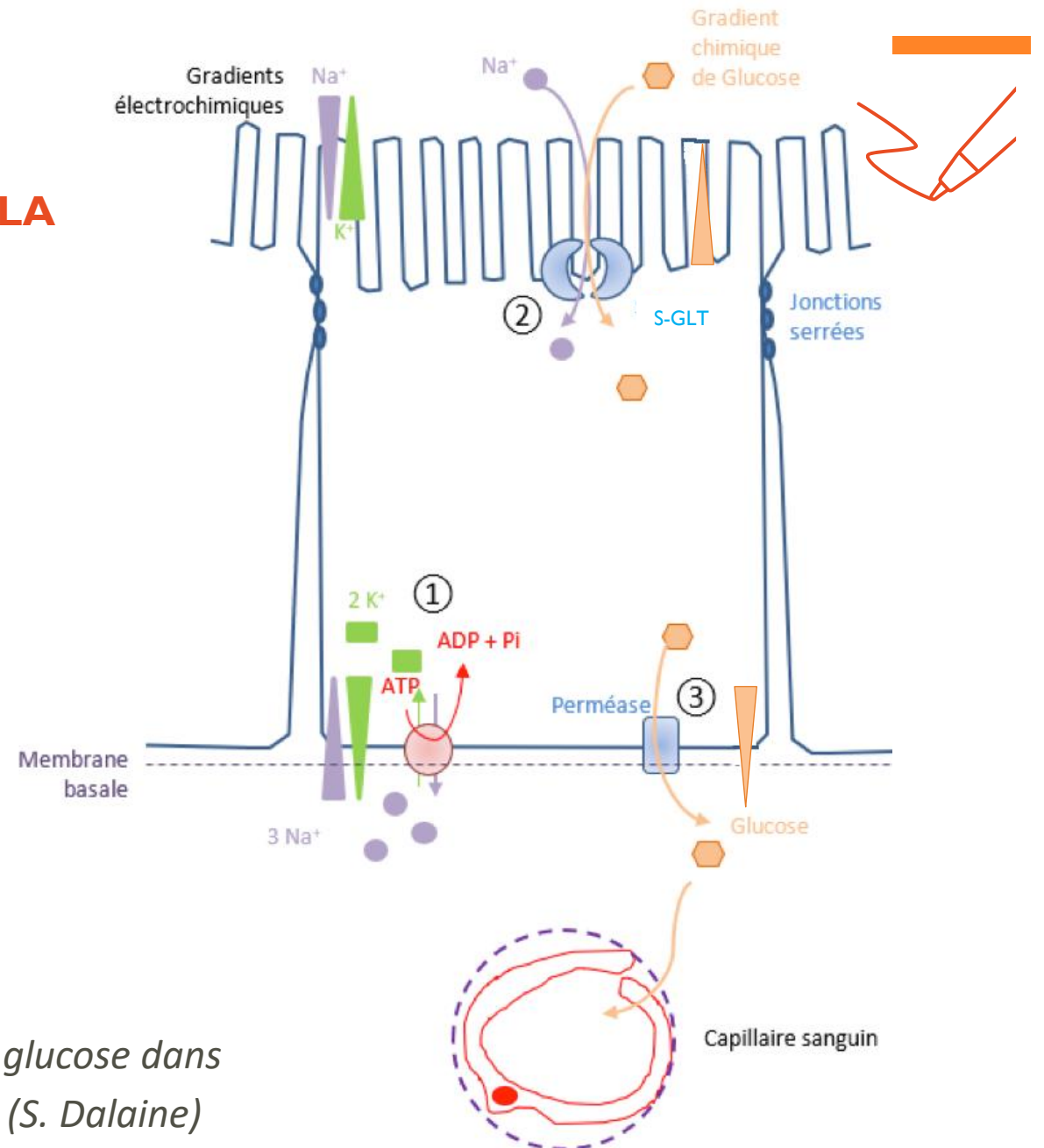
## I- L'APPROVISIONNEMENT ET LE DEVENIR DES MOLECULES ORGANIQUES OU MINERALES DANS LES CELLULES

## B. LES CELLULES HETEROTROPHES PRELEVENT LA MO DANS LEUR ENVIRONNEMENT

### I. L'absorption des glucides

L'entrée du glucose dans l'entérocyte:

- S-GLT: protéine de type symport
- transport actif secondaire



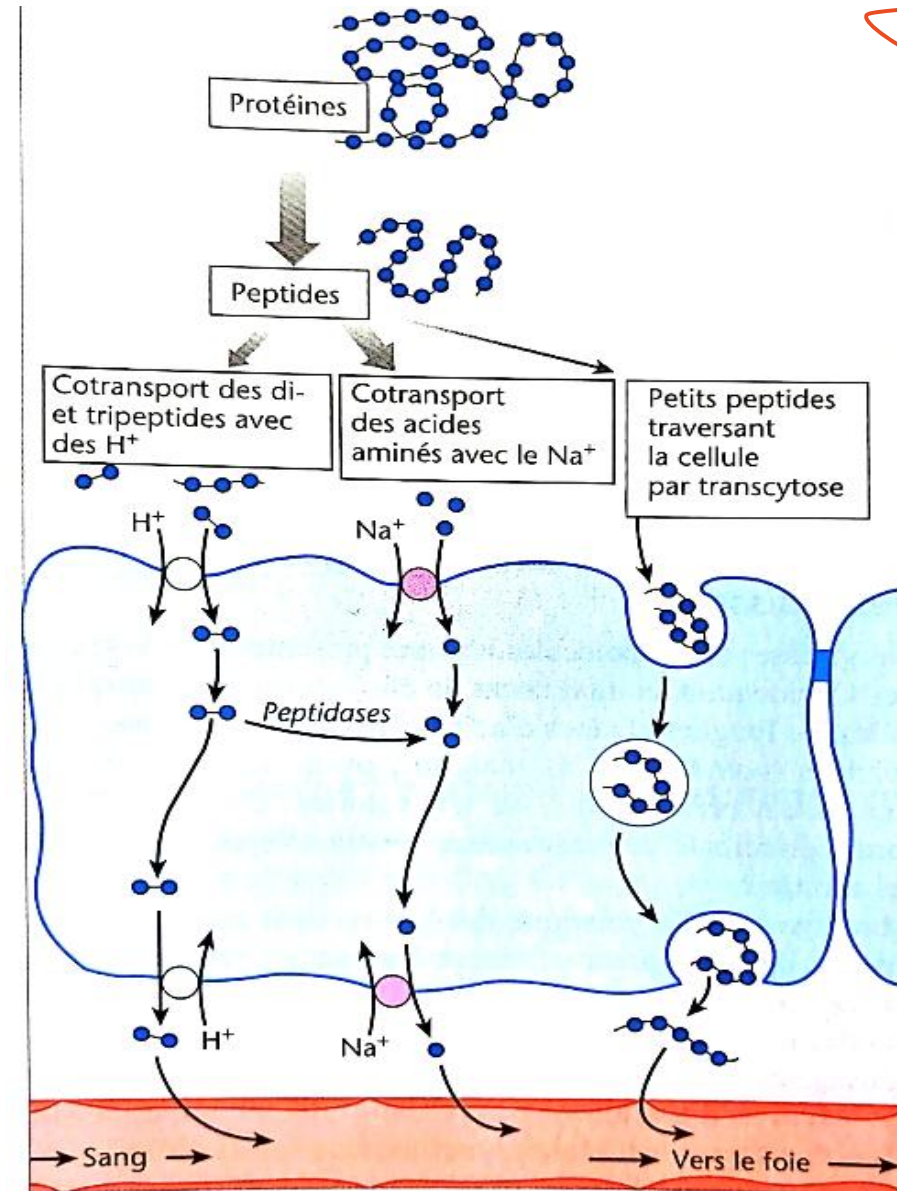
*Transport du glucose dans l'entérocyte (S. Dalaine)*

## B. LES CELLULES HETEROTROPHES PRELEVENT LA MO DANS LEUR ENVIRONNEMENT

### 2. Absorption des acides aminés

- Les entérocytes permettent l'absorption d'AA mais aussi de peptides plus ou moins longs.
- Ils entrent au pôle apical de l'entérocyte et ressortent au pôle basal pour aller dans le sang.
- Les **acides aminés entrent** via un **symport**  $\text{Na}^+/\text{AA}$  et ressortent via un **antiport**  $\text{Na}^+/\text{AA}$
- Les **di- ou tripeptides entrent** via **symport** avec  $\text{H}^+$  et ressortent via un **antiport** avec  $\text{H}^+$
- Petits peptides entrent et sortent via des vésicules par transcytose.

*L'absorption des aa se réalise par transcytose*

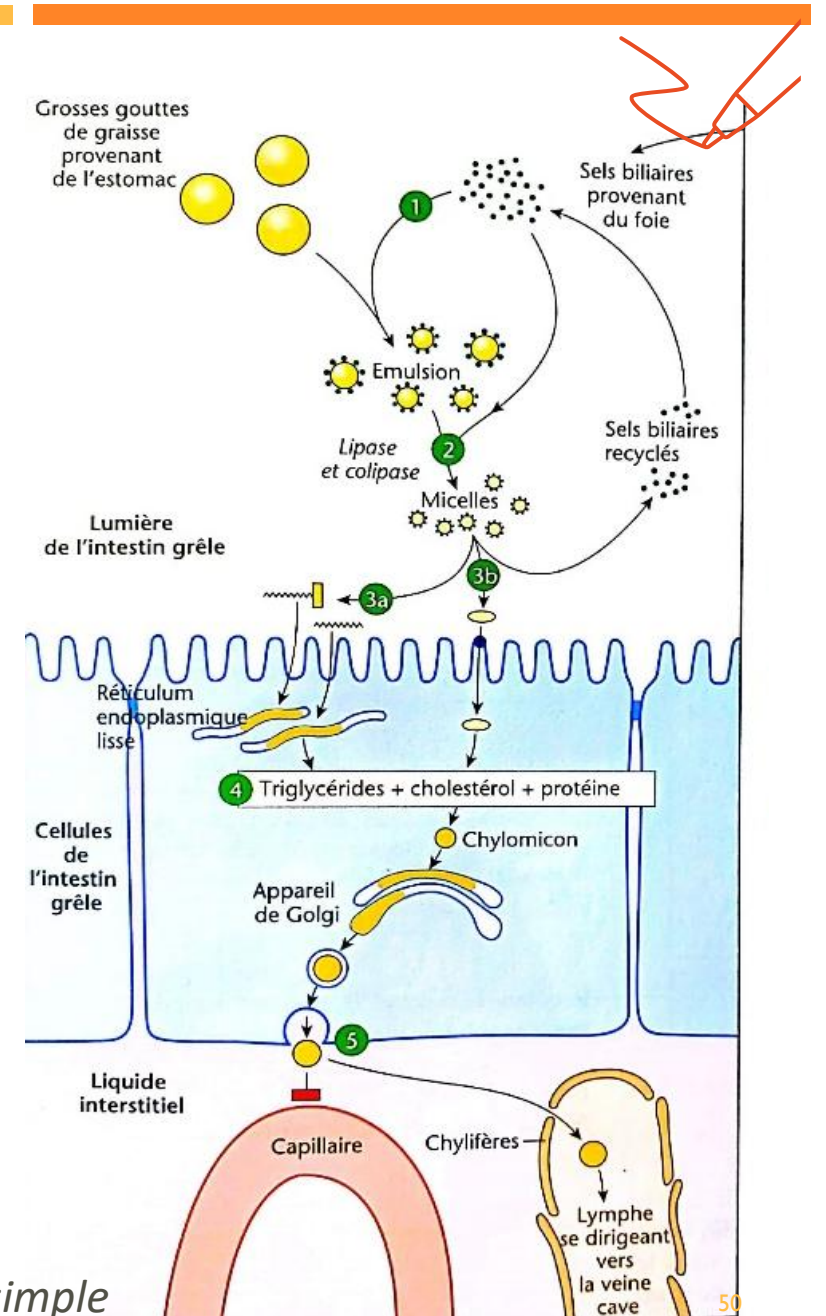


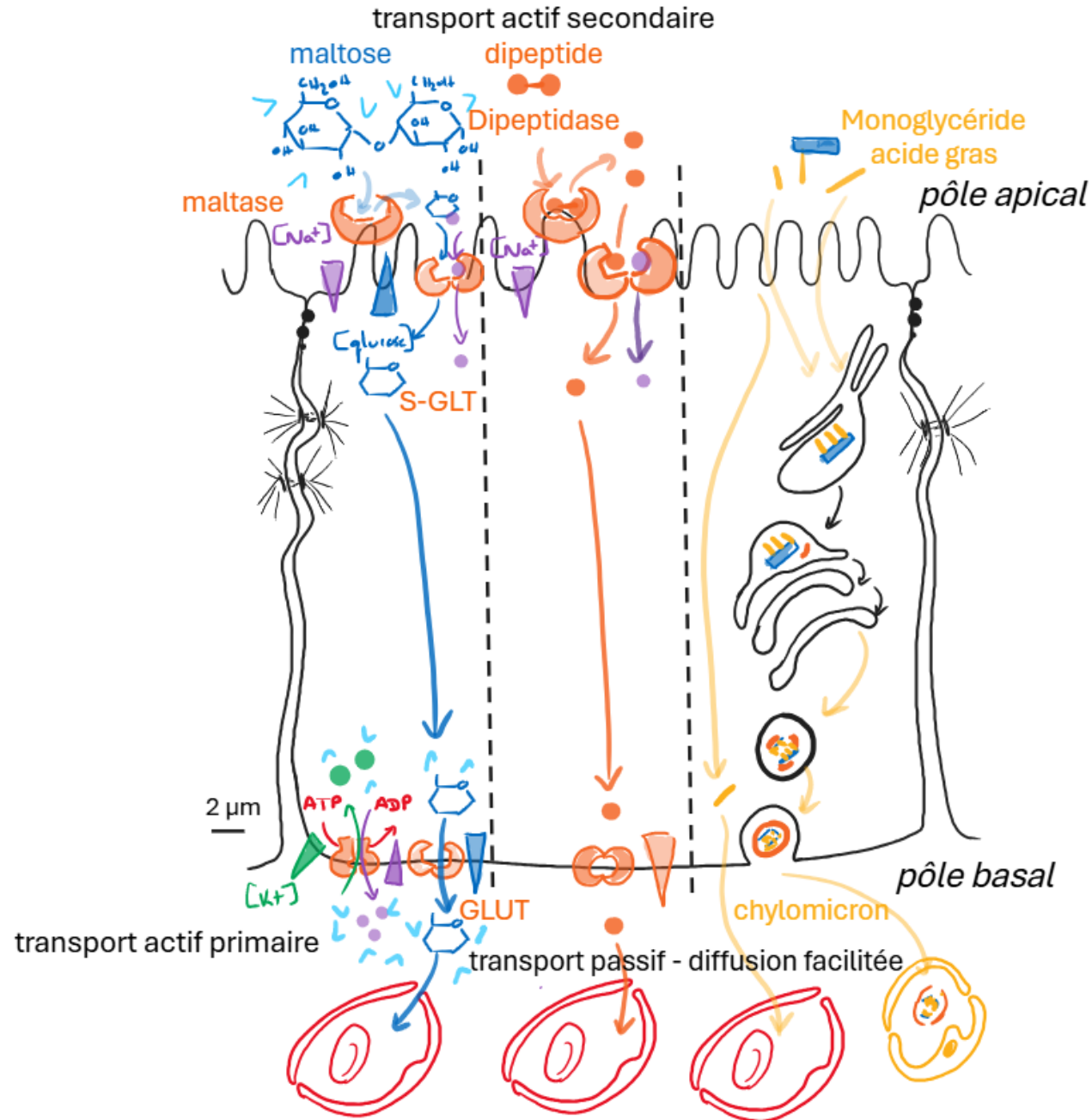
# I- L'APPROVISIONNEMENT ET LE DEVENIR DES MOLECULES ORGANIQUES OU MINERALES DANS LES CELLULES

## B. LES CELLULES HETEROTROPHES PRELEVENT LA MO DANS LEUR ENVIRONNEMENT

### 3. Absorption des lipides

- Après action des lipases, les lipides se trouvent sous forme de **micelles** constitués de MAG, AG et cholestérol
  - Les **MAG** et **AG** entrent dans l'entérocyte par **diffusion simple** à travers la membrane plasmique puis dans le REL
  - Le **cholestérol** entre via un **transporteur** transmembranaire spécifique
- Au sein des entérocytes, MAG et AG forment à nouveau des TAG et s'associent à du cholestérol et des protéines
  - **Chylomicrons**
- Les **chylomicrons** sortent par **exocytose** pour atteindre les **canaux lymphatiques**.





## SV-E-I-A Les formes d'énergie dans la cellule

### I. Les besoins énergétiques cellulaires et leur couverture par des sources énergétiques diversifiées

- A. L'organisation fonctionnelle de l'état cellulaire est indissociable d'un flux énergétique
- B. Les principes thermodynamiques

### II. Les formes d'énergie dans la cellule

- A. Les énergies de réaction
- B. Les énergies de gradients
- C. Les énergies d'oxydo-réduction
- D. L'énergie mécanique

### III. Les couplages énergétiques

- A. Couplage chimio-osmotiques
- B. Couplage osmo-chimique
- C. Couplage osmo-osmotique
- D. Couplage chimio-chimique
- E. L'énergie de réaction permet de faire tourner un cycle

## SV-E-I-B Approvisionnement et devenir des molécules

### I. L'approvisionnement et le devenir des molécules organiques ou minérales dans les cellules

- A. La MO est nécessaire au métabolisme de la cellule
- B. Les cellules hétérotrophes prélèvent la MO
- C. Les cellules autotrophes réduisent la MN prélevée en MO

### II. La photosynthèse assure la réduction des MN en convertissant l'énergie lumineuse

- A. La photosynthèse : une réduction du C minéral
- B. Le cycle de Calvin
- C. La chaîne photosynthétique
- D. La chimiosynthèse: cas de Nitrobacter

## SV-E-IC Pièce centrale des voies du métabolisme énergétique : l'ATP, un coenzyme nucléotidique de transfert de phosphoryle

### I. L'énergie d'hydrolyse d'un coenzyme nucléotidique, l'ATP

- A. Les liaisons phosphoanhydrides
- B.  $\Delta rG^{\circ}$  et  $\Delta rG'$  d'hydrolyse de l'ATP
- C. La position intermédiaire du potentiel d'hydrolyse de l'ATP

### II. De nombreuses transformations cellulaires exploitent des transferts de phosphoryle : utilisation majeure de l'ATP

- A. Des réactions de transfert de phosphoryle
- B. Le bilan sur les transferts de phosphoryle

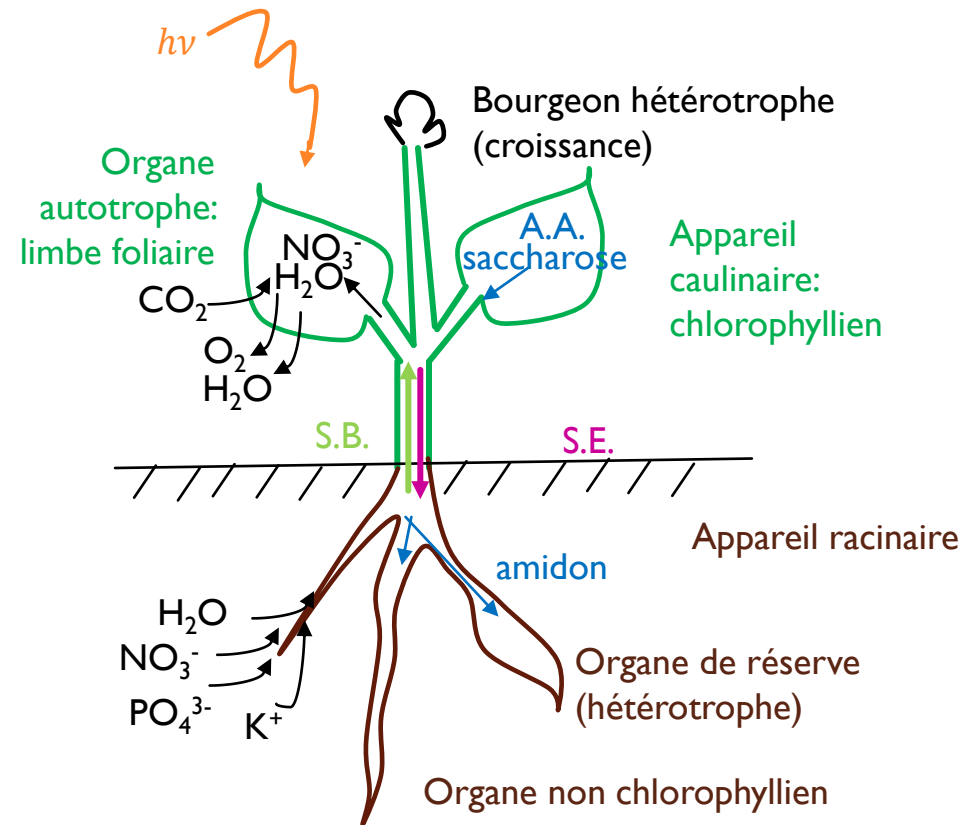
### III. Les couplages permettant la synthèse d'ATP

- A. La formation d'ATP par transphosphorylation
- B. La formation d'ATP par conversion d'une force protomotrice

# I- L'APPROVISIONNEMENT ET LE DEVENIR DES MOLECULES ORGANIQUES OU MINERALES DANS LES CELLULES

## C. LES CELLULES AUTOTROPHES RÉDUISENT LA MATIÈRE MINÉRALE PRÉLEVÉE EN MATIÈRE ORGANIQUE

- Les plantes chlorophylliennes = autotrophes pour C et N
  - capables de fabriquer leur matière organique à partir de matière minérale et de l'énergie lumineuse
  - Assimilation (=réduction) de matière minérale en MO = endergonique → énergie lumineuse nécessaire
- feuille : ( $\text{CO}_2$ ) atmosphérique
- racine: eau du sol + nitrates ( $\text{NO}_3^-$ ) + phosphates ( $\text{PO}_4^{3-}$ ) +  $\text{K}^+$
- tige : circulation des sèves



Photosynthèse à l'échelle de l'organisme

# SV-E-1 L'approvisionnement en matière organique Introduction : les formes d'énergie dans une cellule

## SV-E-I-A Les formes d'énergie dans la cellule

### I. Les besoins énergétiques cellulaires et leur couverture par des sources énergétiques diversifiées

- A. L'organisation fonctionnelle de l'état cellulaire est indissociable d'un flux énergétique
- B. Les principes thermodynamiques

### II. Les formes d'énergie dans la cellule

- A. Les énergies de réaction
- B. Les énergies de gradients
- C. Les énergies d'oxydo-réduction
- D. L'énergie mécanique

### III. Les couplages énergétiques

- A. Couplage chimio-osmotiques
- B. Couplage osmo-chimique
- C. Couplage osmo-osmotique
- D. Couplage chimio-chimique
- E. L'énergie de réaction permet de faire tourner un cycle

## SV-E-I-B Approvisionnement et devenir des molécules

### I. L'approvisionnement et le devenir des molécules organiques ou minérales dans les cellules

- A. La MO est nécessaire au métabolisme de la cellule
- B. Les cellules hétérotrophes prélèvent la MO
- C. Les cellules autotrophes réduisent la MN prélevée en MO

### II. La photosynthèse assure la réduction des MN en convertissant l'énergie lumineuse

- A. La photosynthèse : une réduction du C minéral
- B. Le cycle de Calvin
- C. La chaîne photosynthétique
- D. La chimiosynthèse: cas de Nitrobacter

## SV-E-IC Pièce centrale des voies du métabolisme énergétique : l'ATP, un coenzyme nucléotidique de transfert de phosphoryle

### I. L'énergie d'hydrolyse d'un coenzyme nucléotidique, l'ATP

- A. Les liaisons phosphoanhydrides
- B.  $\Delta rG^{\circ}$  et  $\Delta rG'$  d'hydrolyse de l'ATP
- C. La position intermédiaire du potentiel d'hydrolyse de l'ATP

### II. De nombreuses transformations cellulaires exploitent des transferts de phosphoryle : utilisation majeure de l'ATP

- A. Des réactions de transfert de phosphoryle
- B. Le bilan sur les transferts de phosphoryle

### III. Les couplages permettant la synthèse d'ATP

- A. La formation d'ATP par transphosphorylation
- B. La formation d'ATP par conversion d'une force protomotrice

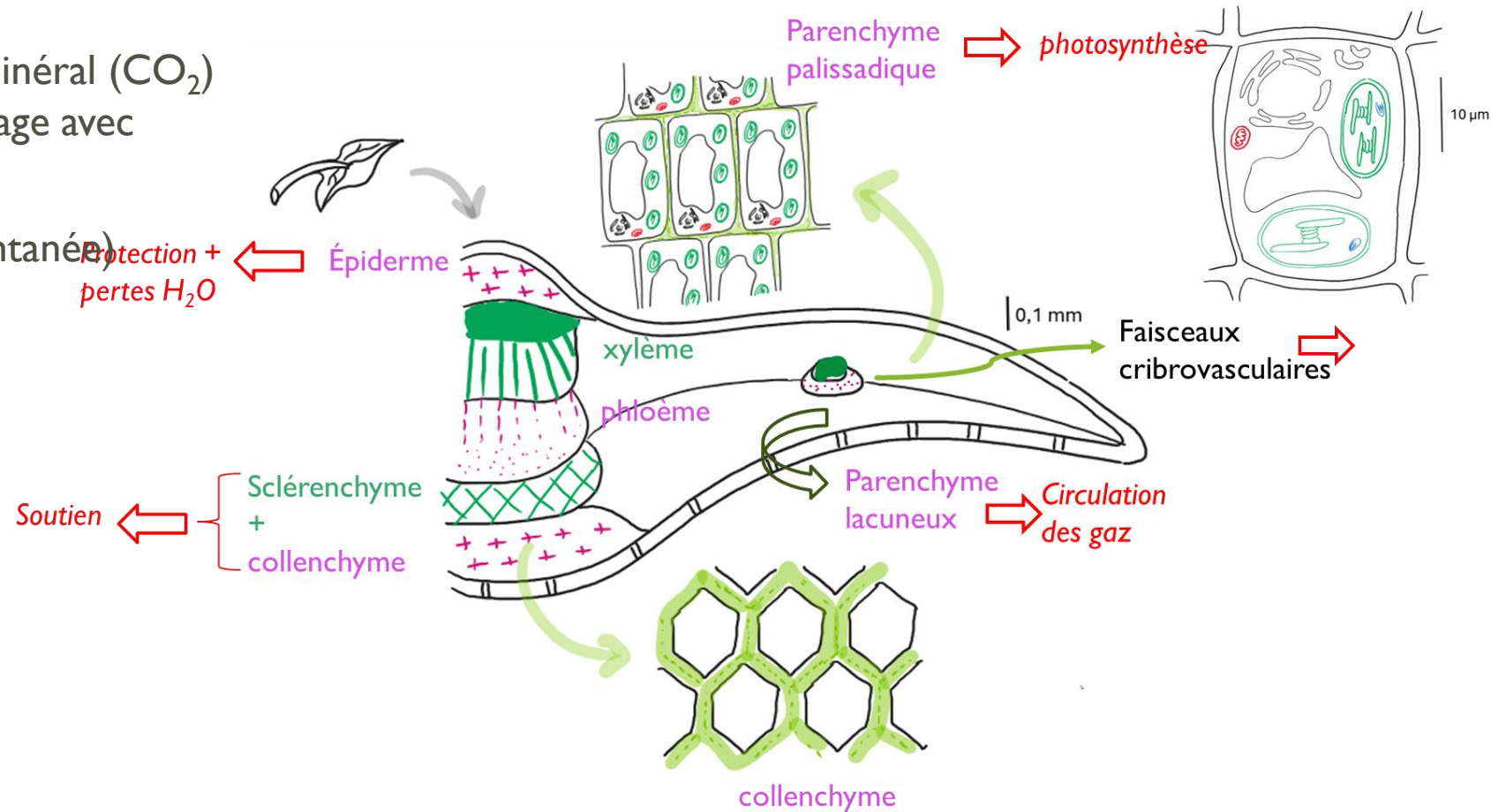
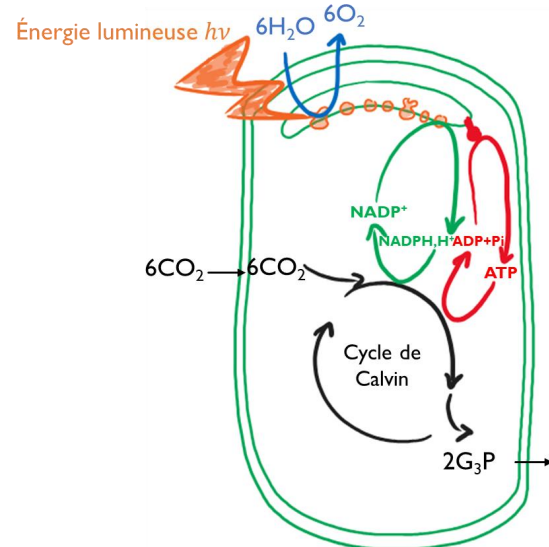
# II- LA PHOTOSYNTHESE ASSURE LA REDUCTION DES MOLECULES MINERALES PRELEVEES EN CONVERTISSANT L'ENERGIE LUMINEUSE

## A. LA PHOTOSYNTHESE : UNE REDUCTION DU C MINERAL EN DEUX PHASES

Cf SV-A-2  
SV-D

- Photosynthèse: réduction du C minéral ( $\text{CO}_2$ ) en C organique ( $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$ ), couplage avec oxydation de  $\text{H}_2\text{O}$  en  $\text{O}_2$
- Réaction endergonique (non spontanée)

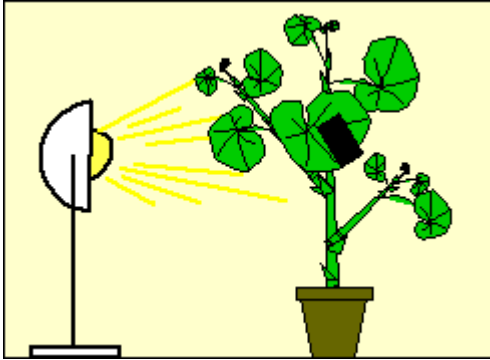
=> énergie photonique  $h\nu$



## A. LA PHOTOSYNTHESE : UNE REDUCTION DU C MINERAL EN DEUX PHASES

### I. Les végétaux chlorophylliens sont photolithotrophes

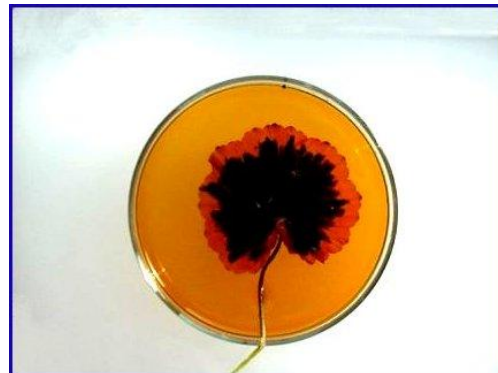
#### I.1. Mise en évidence du rôle de la lumière et de la chlorophylle dans l'assimilation du carbone minéral en carbone organique



Un pot de Pélargonium à feuilles panachées est mis au soleil direct pendant 4 heures. La partie blanche des feuilles ne contient pas de chlorophylle.



On place la feuille prélevée dans l'alcool bouillant. Elle en ressort décolorée après 3 minutes.



Intérêt: l'alcool va détruire l'ensemble des pigments. Ainsi, lors de l'ajout de l'eau iodée (jaune) la coloration due (noire si présence d'amidon) à ce réactif sera nettement visible.

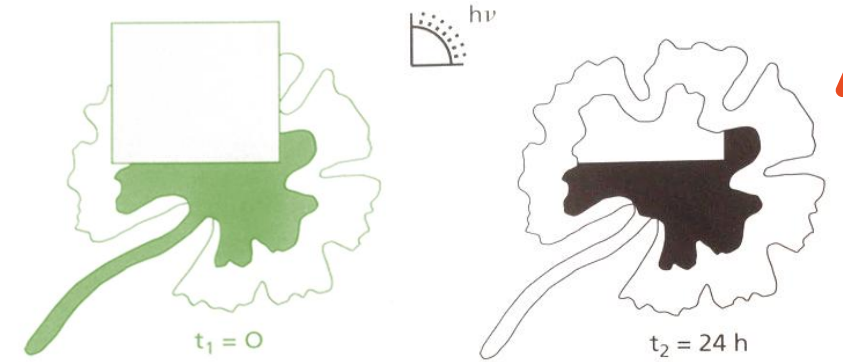


Figure 6.1 Mise en évidence de la synthèse d'amidon par les parties chlorophylliennes éclairées d'une feuille panachée de Pélargonium.

La feuille est exposée 24 heures à la lumière. Elle est alors plongée dans de l'alcool bouillant, jusqu'à décoloration. Suivent un rinçage à l'eau et un traitement au lugol. La coloration bleu nuit spécifique de l'amidon est ici représentée en noir.

Les chloroplastes d'une feuille d'Élodée, éclairée pendant une journée, montée dans du lugol, montrent une ou quelques taches de couleur sombre en leur sein (figure 6.2). Elles n'apparaissent pas dans des feuilles laissées à l'obscurité.

D'après BIOLOGIE tout-en-un 1<sup>ère</sup> année BCPST p.209

- Les parties vertes, **chlorophylliennes**, sont capables en présence d'**énergie lumineuse** de synthétiser de la MO, sous forme d'**amidon**



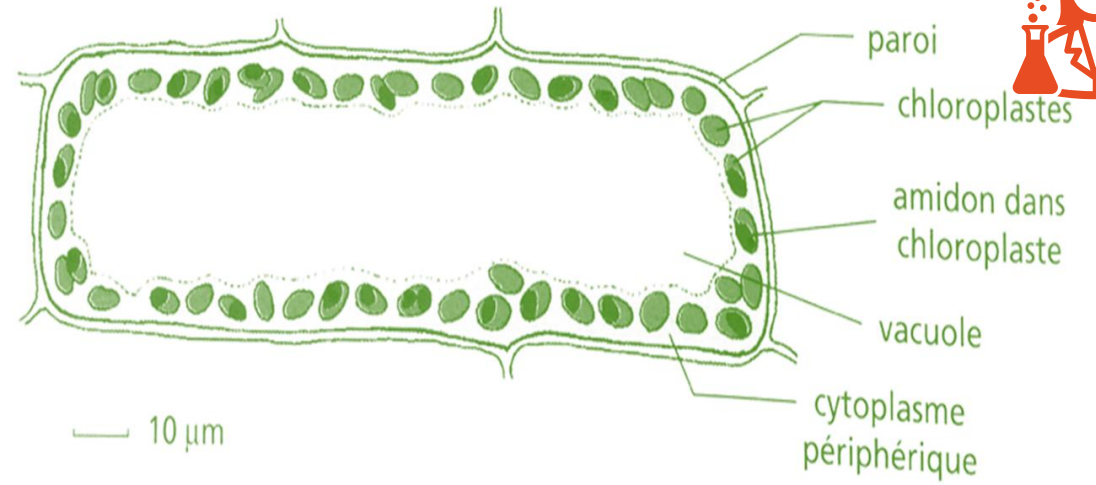
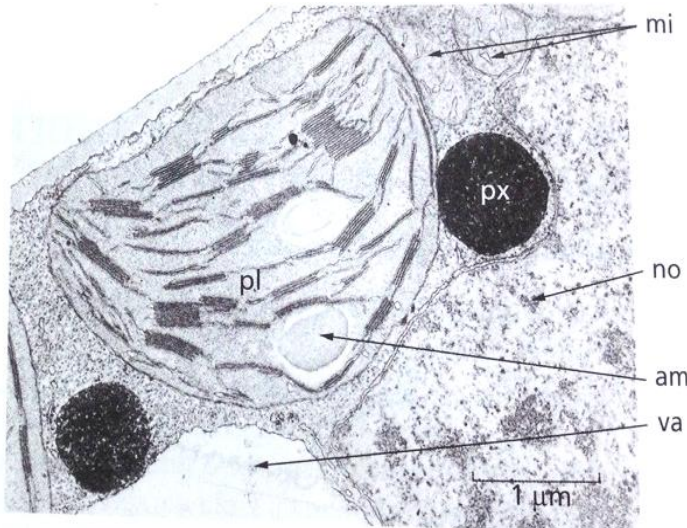
<http://www.snv.jussieu.fr/bmedia/Photosynthese/exp13.html>

Même expérience réalisée sur une feuille panachée. A gauche, une feuille de coleus, la partie extérieure est verte (chlorophylles), la partie intérieure est rouge (anthocyanes), la zone intermédiaire est brune ; à droite, après exposition à la lumière, décoloration à l'éthanol bouillant puis coloration par le lugol, les régions vertes et brunes sont colorées en bleu-noir, elles ont donc synthétisé de l'amidon. La couleur brune est due à l'association de deux pigments photosynthétiques ( anthocyanes et chlorophylles).

Figure 6.3

Présence d'amidon dans le stroma d'un chloroplaste de feuille de Tabac.

am : amidon,  
mi : mitochondrie,  
no : noyau,  
pl : chloroplaste,  
px : péroxysome,  
va : vacuole.

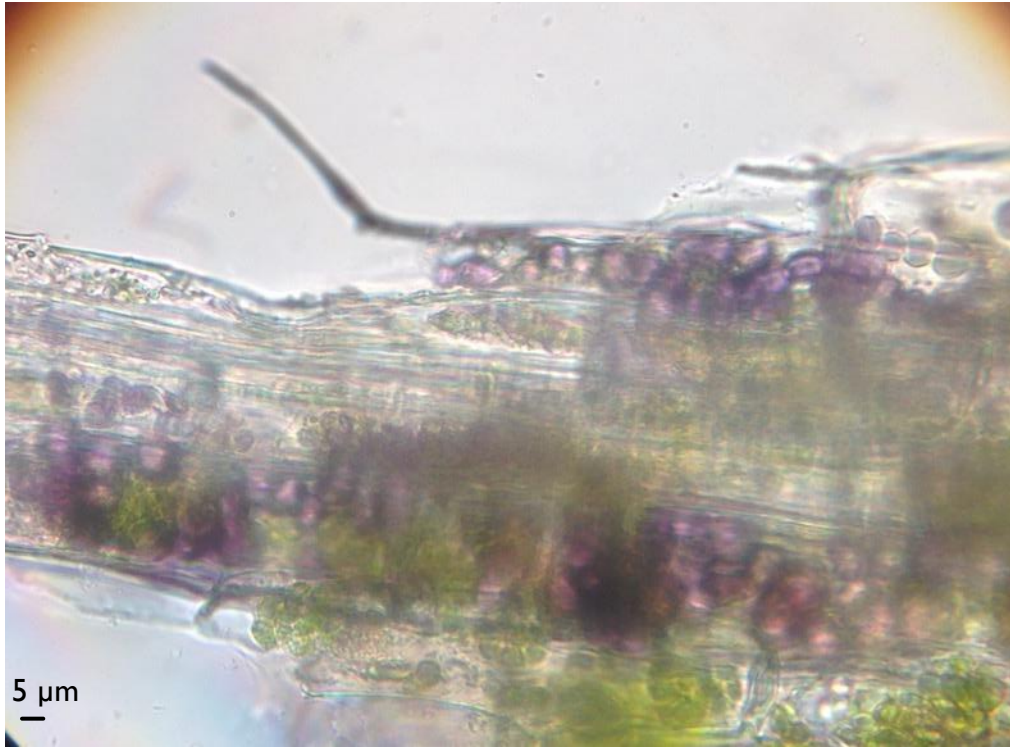


Présence d'amidon dans les chloroplastes d'une feuille d'Elodée  
D'après BIOLOGIE tout-en-un 1<sup>ère</sup> année BCPST p.209

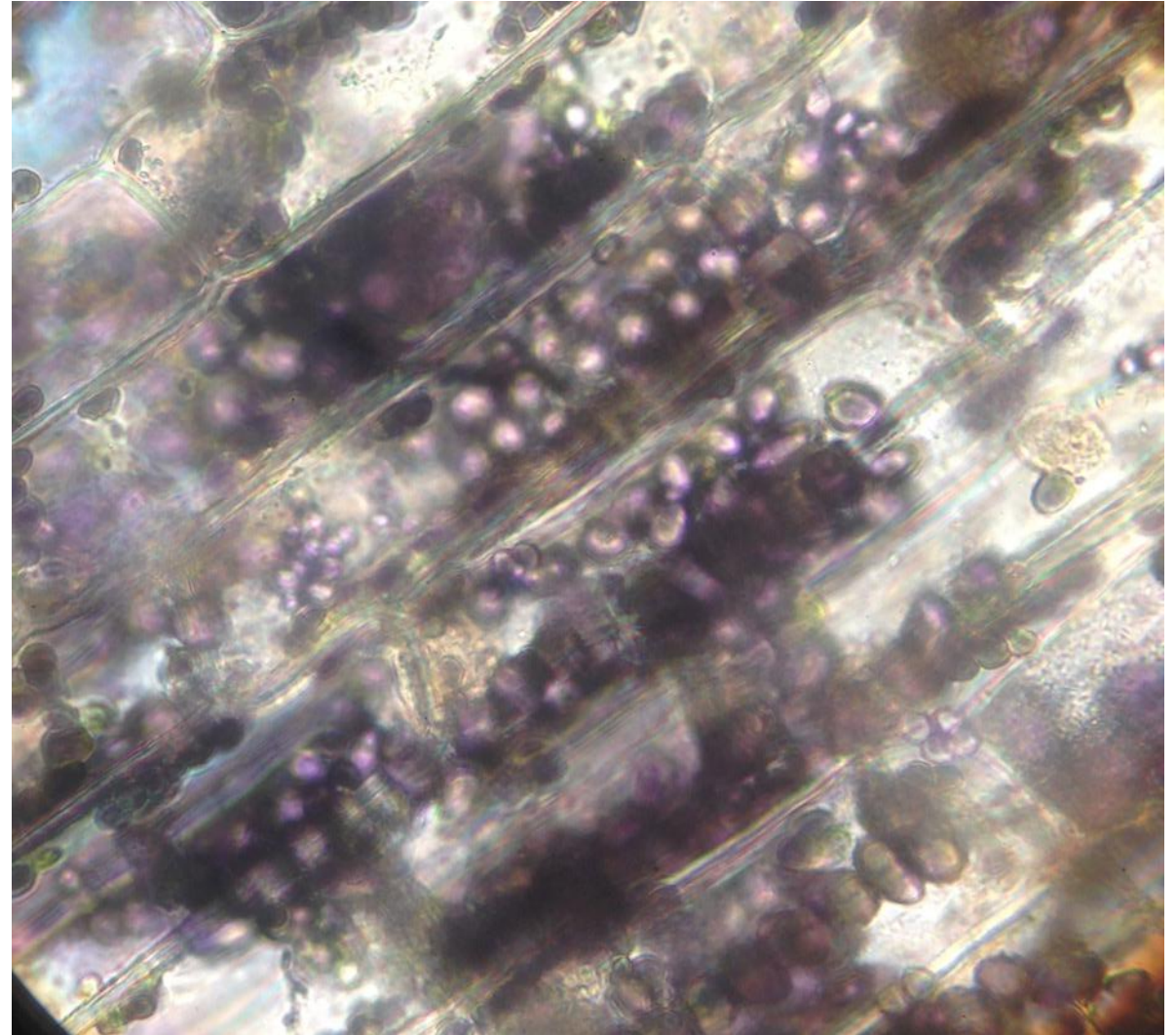


SVT TS Spécialité Bordas ed 2012 Activités pratiques 2

Cette photo assimilation a lieu dans les cellules du **mésophylle** au sein d'organites verts, les **chloroplastes**



*Chloroplastes dans des cellules de parenchyme de limbe d'Elodée, observés au MO, colorés au lugol (S. Dalaine)*



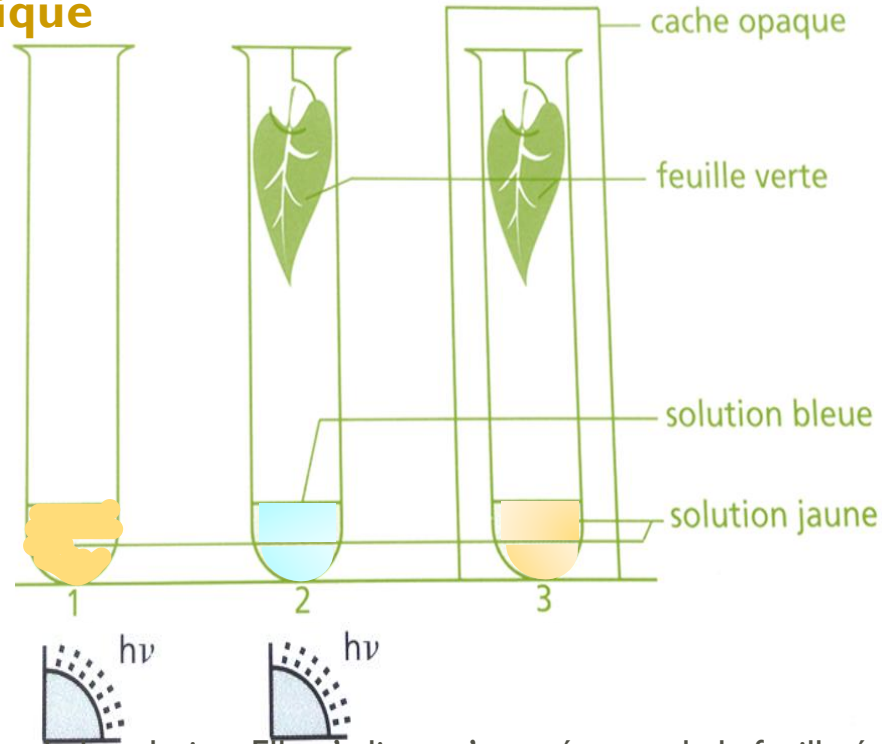
5 μm

### I. Les végétaux chlorophylliens sont photolithotrophes



#### I.1. Mise en évidence du rôle de la lumière et de la chlorophylle dans l'assimilation du carbone minéral en carbone organique

- Absorption de dioxyde de carbone par une feuille éclairée
- Au temps initial les trois tubes contiennent une solution jaune de **bleu de bromothymol**.
  - Quelques heures après, la solution vire au bleu dans le tube n°2.
  - Elle reste jaune dans les deux autres tubes



- On a voulu tester le rôle du  $\text{CO}_2$
- Le  $\text{CO}_2$  est fixé par la feuille verte ssi cette dernière est éclairée
  - L'assimilation du carbone minéral nécessite de l'énergie lumineuse

Le tube n°2 montre une alcalinisation de la solution. Elle n'a lieu qu'en présence de la feuille éclairée. Elle est due à une modification de la composition de l'atmosphère puisque la feuille n'est pas au contact direct de la solution. L'équilibre de la réaction est déplacé dans le sens de la consommation des ions hydrogénocarbonates ( $\text{HCO}_3^-$ ), elle-même due à un départ de dioxyde de carbone:

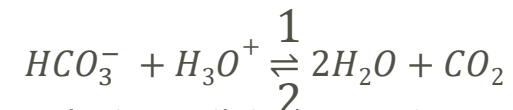
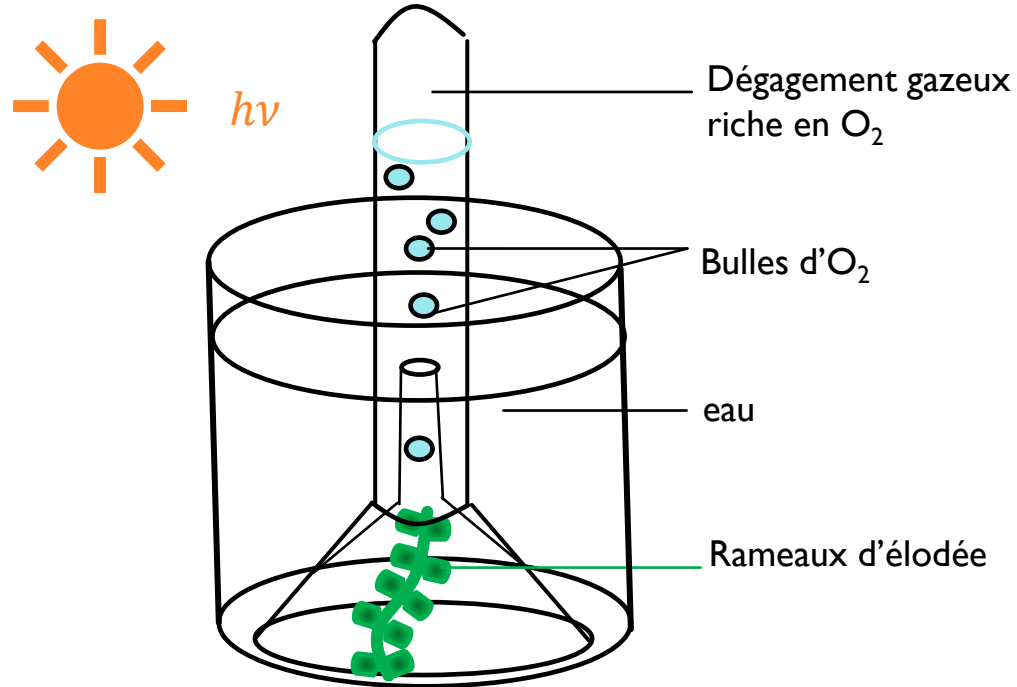


Figure 10 : mise en évidence d'absorption de  $\text{CO}_2$  par une feuille chlorophyllienne

## A. LA PHOTOSYNTHESE : UNE REDUCTION DU C MINERAL EN DEUX PHASES

### 1. Les végétaux chlorophylliens sont photolithotrophes

#### 1.2. Mise en évidence d'un dégagement de dioxygène et de son origine



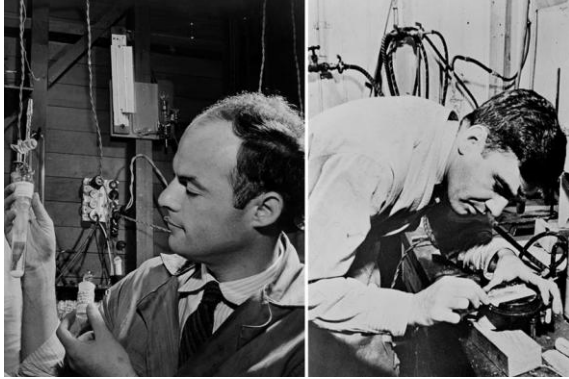
- Dégagement d'O<sub>2</sub> si CO<sub>2</sub> présent  
→ échanges gazeux = O<sub>2</sub> et CO<sub>2</sub>
  - mais cela n'implique pas un lien chimique entre O<sub>2</sub> et CO<sub>2</sub> !
  - N.B. le végétal continue de respirer

Dégagement de dioxygène par des rameaux d'élodée éclairés (source: BIOLOGIE tout-en-un 1<sup>ère</sup> année)

Montage réalisé avec une plante aquatique, Myriophylle ou Elodée. Le gaz dégagé ravive la combustion d'une allumette incandescente, il s'agit de dioxygène. Ce dégagement nécessite de la lumière. Il est d'autant plus intense que l'eau est enrichie en dioxyde de carbone. Si l'eau est dépourvue de gaz (eau préalablement portée à ébullition) aucun dégagement n'est observé.

## I. Les végétaux chlorophylliens sont photolithotrophes

### I.2. Mise en évidence d'un dégagement de dioxygène et de son origine



Samuel Ruben (1913-1943) and Martin Kamen (1913-2002)

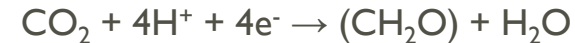
- Protocole:
- Utilisation d'un **isotope lourd** de l'oxygène ( $^{18}\text{O}$ ) à la place de l'oxygène habituel ( $^{16}\text{O}$ )
- Résultats:
  - Lorsque  $(\text{H}_2^{18}\text{O}) \rightarrow ^{18}\text{O}_2$
- ⇒ l'eau ( $\text{H}_2\text{O}$ ) est à l'origine du dioxygène produit.
- ⇒ pour former une molécule de dioxygène, il faut donc 2 molécules d'eau.

- Décomposer de réaction photosynthétique en deux groupes de réactions :

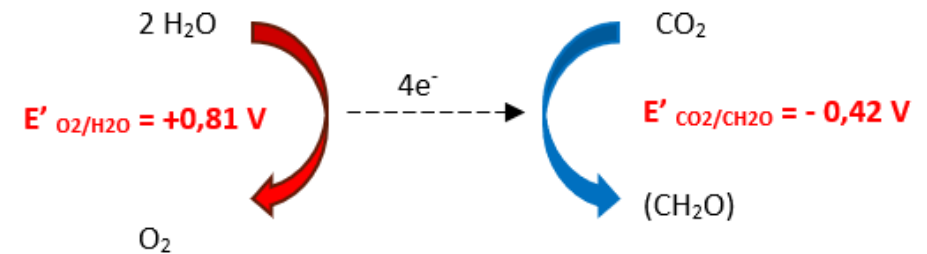
- Oxydation de l'eau :



- Réduction du carbone :



- Réactions d'OXYDO-REDUCTION faisant intervenir des transporteurs de protons ( $\text{H}^+$ ) et d'électrons ( $\text{e}^-$ ).

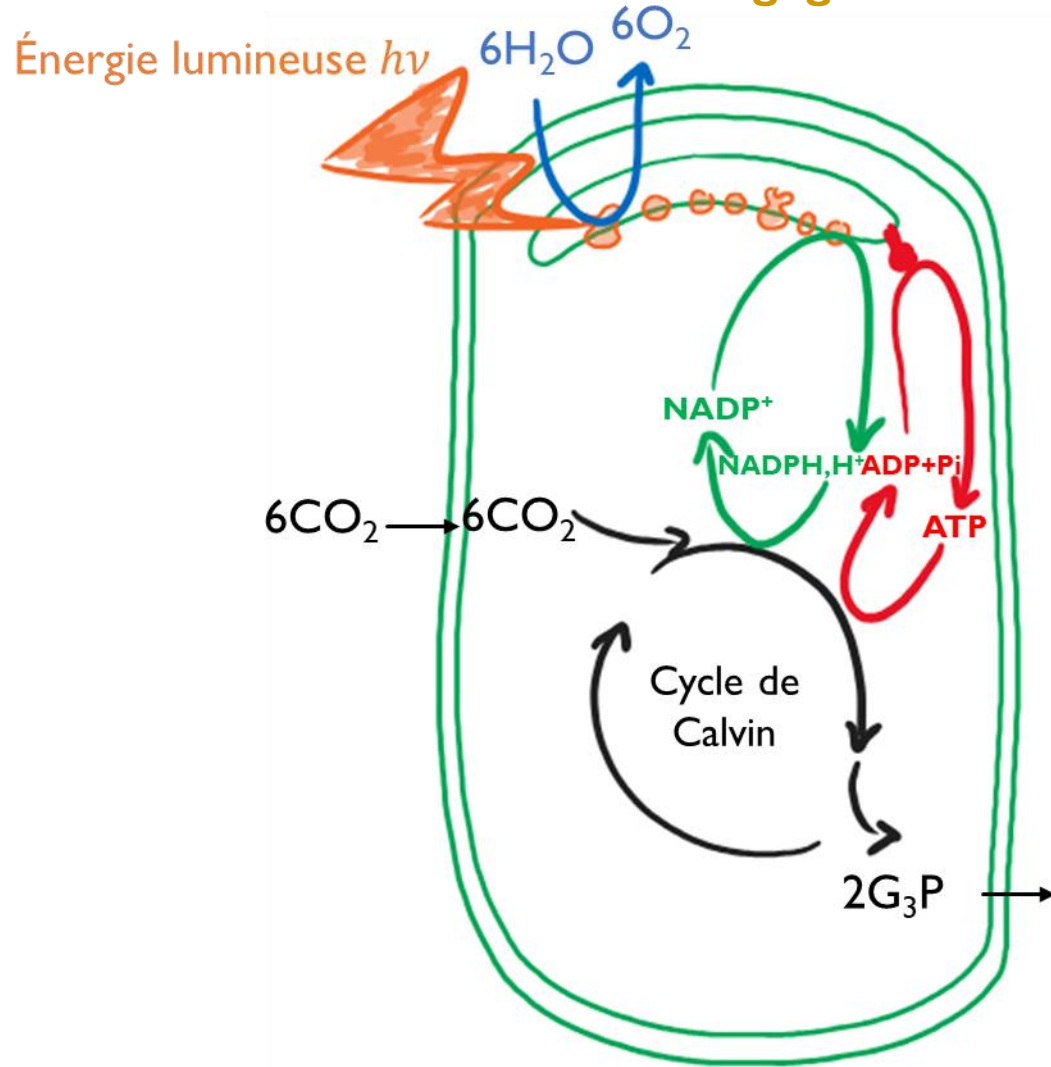


- $\Delta G^{\circ'} = -nF\Delta E$  soit  $\Delta G^{\circ'} = -4.96\ 500.(-0,42-0,81) = 475 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$
- $\Delta G^{\circ'} > 0$
- **Réaction endergonique**

## A. LA PHOTOSYNTHESE : UNE REDUCTION DU C MINERAL EN DEUX PHASES

### I. Les végétaux chlorophylliens sont photolithotrophes

#### I.2. Mise en évidence d'un dégagement de dioxygène et de son origine



- Équation bilan de la photosynthèse



- $\Delta G^{\circ} = 6 \times 475 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1} = 2850 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$

- $\Delta G^{\circ} \gg 0$

- La photosynthèse est une **oxydoréduction endergonique** (l'eau est un réducteur faible).

- nécessite un apport extérieur d'énergie = l'énergie lumineuse.

- végétaux chlorophylliens = **PHOTOLITHOAUTOTROPHES**

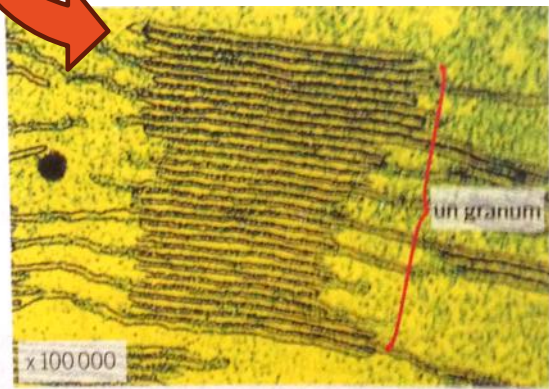
- ✓ Source d'énergie : **photo**/chimiotrophie

- ✓ Source d'électrons : **litho**/organotrophie

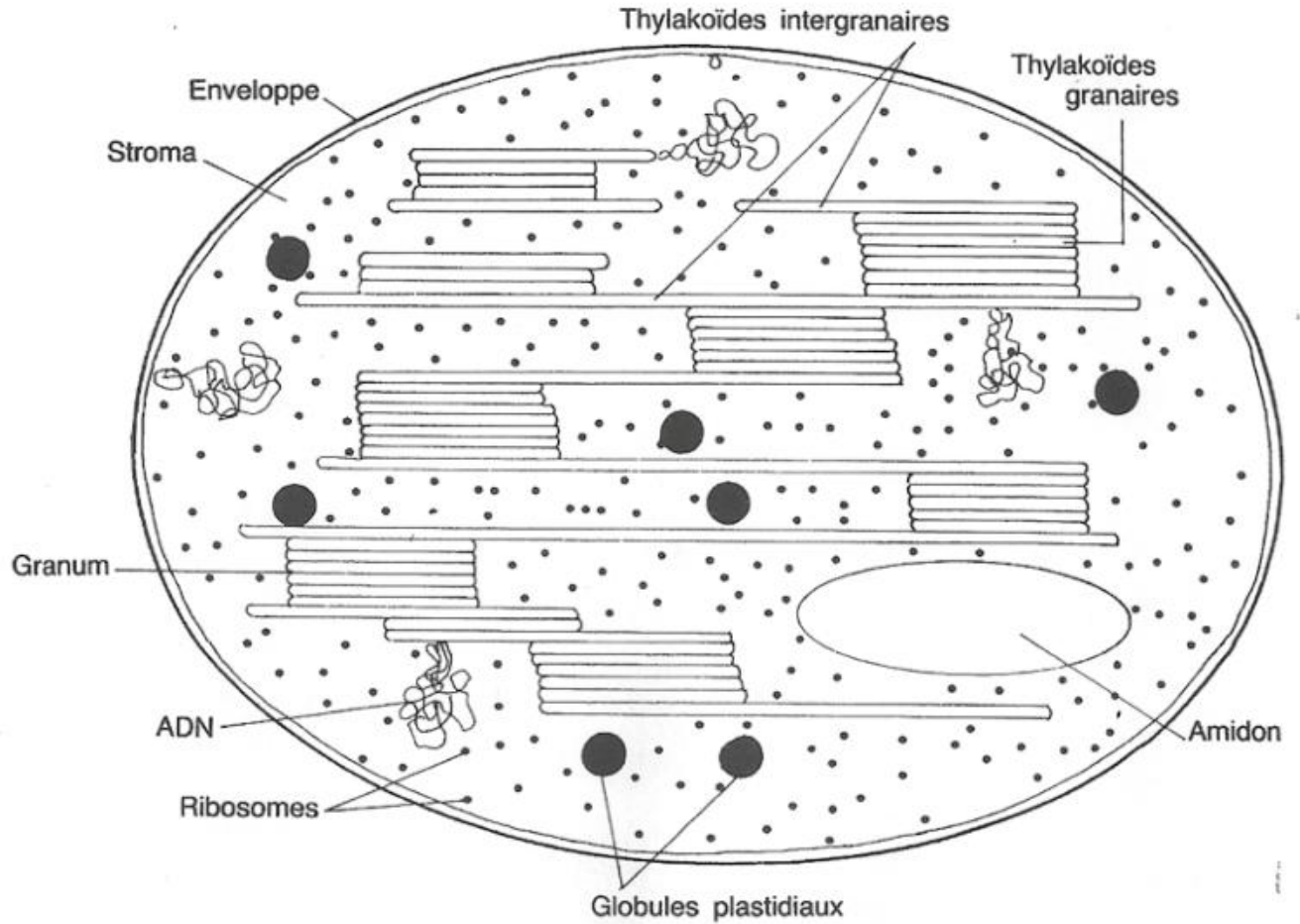
- ✓ Source de matière : **auto**/hétérotrophie



Chloroplaste au MET



Un granum est constitué par un empilement de disques appelés thylakoïdes.

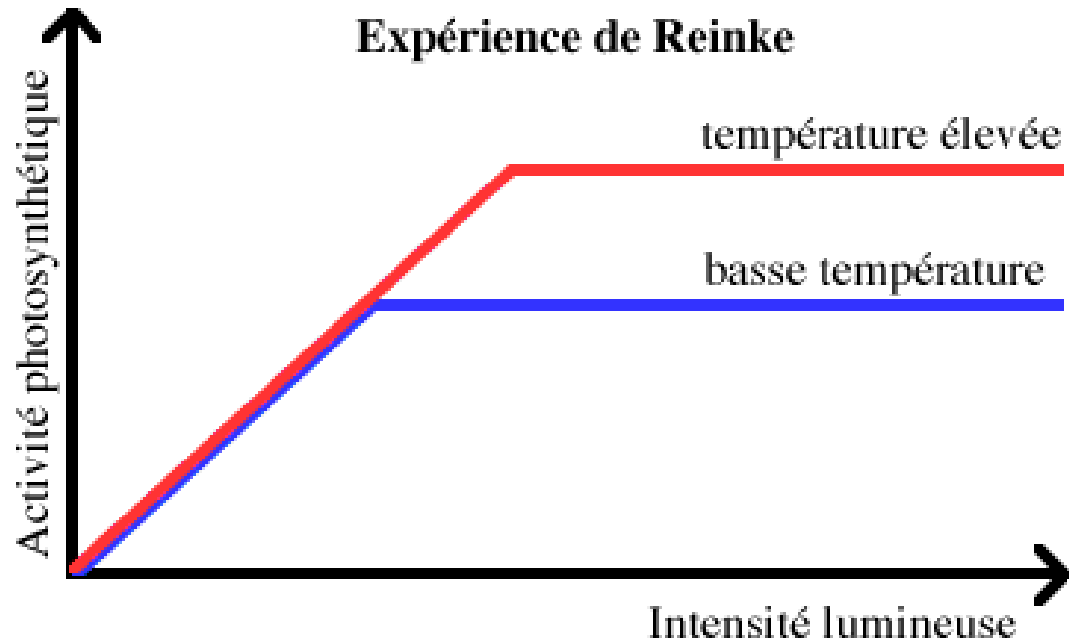


Croquis d'un chloroplaste (in Robert et Rolland, Douin, 1989)

## A. LA PHOTOSYNTHESE : UNE REDUCTION DU C MINERAL EN DEUX PHASES

### 2. La photosynthèse comprend deux phases

#### 2.1. Expérience de Reinke, interprétation de Blackman



Graphique illustrant de façon simplifiée les résultats de l'expérience de REINKE.

- En 1883, REINKE, test d'hypothèse: l'activité photosynthétique est proportionnellement liée à l'intensité lumineuse
- Résultats:  $\nearrow$  de l'activité photosynthétique jusqu'à une valeur seuil d'intensité lumineuse
- => il existe une phase photochimique mais avec existence d'une saturation
- Hyp: existence de facteurs limitants et donc de deux phases de la photosynthèse. La 2<sup>nd</sup>e phase pourrait être exclusivement chimique => test en faisant varier la température (les enzymes sont sensibles à T°C)
- Résultats:
- L'augmentation de la température a un effet sur l'activité photosynthétique en 2<sup>nd</sup> temps

=> 2 phases dont la 1<sup>ère</sup> phase photochimique et la 2<sup>nd</sup>e phase chimique

Phase claire

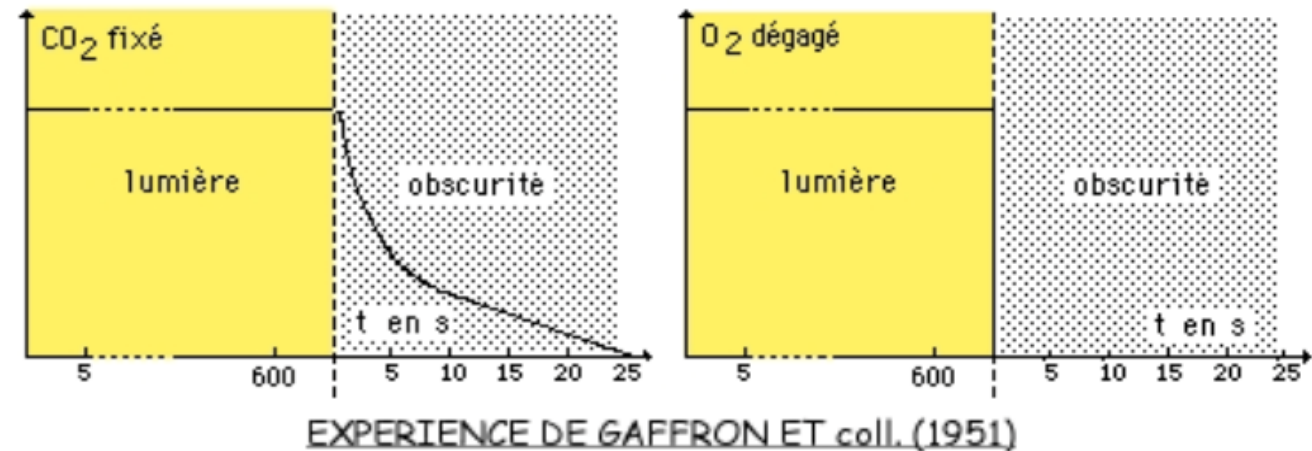
Phase sombre

## 2. La photosynthèse comprend deux phases

### 2.2. Expérience de Gaffron



- En 1951, GAFFRON, test d'hypothèse: la fixation du  $\text{CO}_2$  et la libération d'  $\text{O}_2$  sont dissociées dans le temps (cf 2 phases de la photosynthèse)
  - Suivre taux de  $\text{CO}_2$  fixé et dégagement de  $\text{O}_2$  en phase lumineuse suivie d'obscurité
- Résultats:
  - Dégagement d'  $\text{O}_2$  exclusivement à la lumière
    - ⇒ phase photochimique est l'oxydation de  $\text{H}_2\text{O}$  en  $\text{O}_2$
  - Fixation de  $\text{CO}_2$  poursuivie pdt obscurité
    - ⇒ réduction de  $\text{CO}_2$  en  $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$  pendant phase chimique
  - Fixation de  $\text{CO}_2$  diminue et devient nulle 30 sec en obscurité
    - ⇒ La phase chimique, utilise les produits de la phase lumineuse



# A. LA PHOTOSYNTHESE : UNE REDUCTION DU C MINERAL EN DEUX PHASES

## 2. La photosynthèse comprend deux phases

### 2.3. Expérience de Hill : mise en évidence de l'existence d'intermédiaires entre l'oxydation d'H<sub>2</sub>O et la réduction de CO<sub>2</sub>

Cf Tale Spé

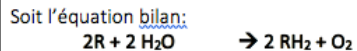
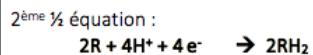
#### Mise en situation et recherche à mener

Dans la réaction de photosynthèse, l'eau apparaît comme un donneur d'hydrogène et d'électrons alors que le dioxyde de carbone apparaît comme un accepteur d'hydrogène et d'électrons.  
 En 1937, Hill envisagea, l'existence d'un intermédiaire qui accepterait les électrons provenant de l'eau pour les transférer au dioxyde de carbone.  
 Il entreprit de vérifier cette idée en remplaçant cet intermédiaire inconnu par un oxydant artificiel (le réactif de Hill) qui serait réduit à la lumière par les électrons provenant de l'eau.

**On cherche à montrer que la phase photochimique de la photosynthèse nécessite de la lumière et un accepteur d'électrons.**

#### Ressources

En 1937, Hill émet l'hypothèse que la première étape de la photosynthèse est globalement une oxydoréduction entre l'eau et une substance oxydante, appelée ici « R » :



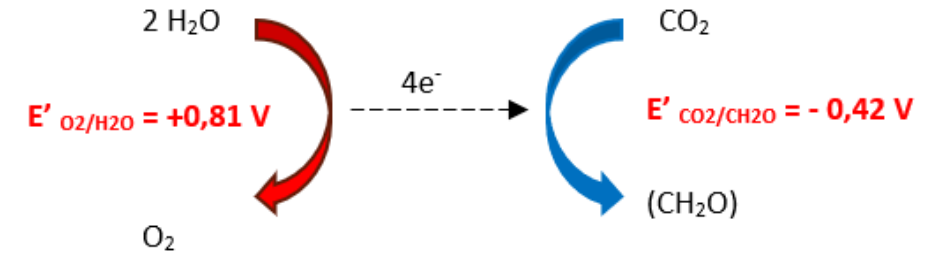
Le réactif de Hill, solution de ferricyanure de potassium, contient du fer à l'état oxydé (Fer ferrique Fe<sup>3+</sup>), il s'effectue sans apport de CO<sub>2</sub>.

Feuilles fraîches d'épinard  
 Mortier et pilon pour broyage  
 Entonnoir, gaze, centrifugeuse  
 et tube à essai pour récolter les chloroplastes  
 Matériel ExAO avec sonde à O<sub>2</sub>  
 Lumière et cache lumineux  
 Seringue et réactif de Hill

#### Etape 1 : Concevoir une stratégie pour résoudre une situation problème (durée recommandée : 10 minutes)

**Proposer une stratégie de résolution réaliste, permettant de mettre en évidence la nécessité de la lumière et de l'accepteur d'électrons pendant la phase photochimique, en réalisant une mesure ExAO.**

**Appeler l'examineur pour présenter oralement votre proposition et obtenir la suite du sujet.**



- En 1937, HILL, test d'hypothèse: il existe un **intermédiaire** dans la réaction redox de la photosynthèse, l'oxydation de H<sub>2</sub>O ayant lieu pendant la phase claire et la réduction de CO<sub>2</sub> pendant la phase sombre
- Utilisation d'un réactif: le réactif de Hill (ferricyanure Fe<sup>3+</sup> => puissant oxydant)
- Résultats: ↗ de l'activité photosynthétique jusqu'à une valeur seuil d'intensité lumineuse

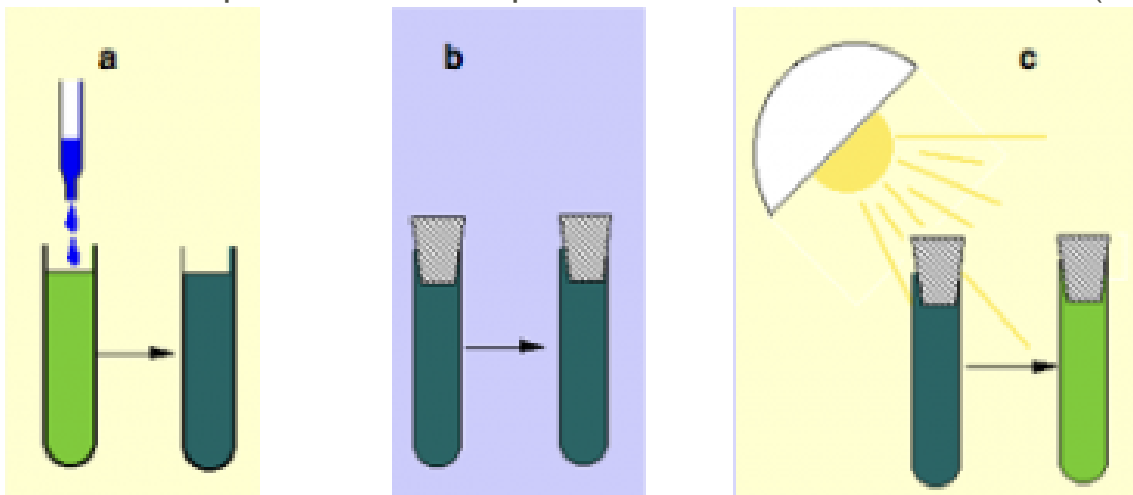
=> il existe une phase photochimique mais avec existence d'une saturation

# A. LA PHOTOSYNTHESE : UNE REDUCTION DU C MINERAL EN DEUX PHASES

## 2. La photosynthèse comprend deux phases

### 2.3. Expérience de Hill : mise en évidence de l'existence d'intermédiaires entre l'oxydation d'H<sub>2</sub>O et la réduction de CO<sub>2</sub>

- On cherche à montrer que la phase photochimique de la photosynthèse nécessite de la lumière et un accepteur d'électrons. On sait que la phase photochimique est une réaction redox entre H<sub>2</sub>O, réducteur, et un oxydant qui pourrait être le réactif de Hill;
- On teste l'importance d'un accepteur d'électrons, via le réactif de Hill (oxydant)



Du DCPIP (dichloro-phéno-indo-phénol) qui a la propriété d'être bleu à l'état oxydé et incolore à l'état réduit est ajouté à la suspension de chloroplastes, la solution bleuit (a).

Le tube est placé à l'obscurité, la solution reste bleue (b).

Le tube est placé à la lumière, la solution se décolore (c).

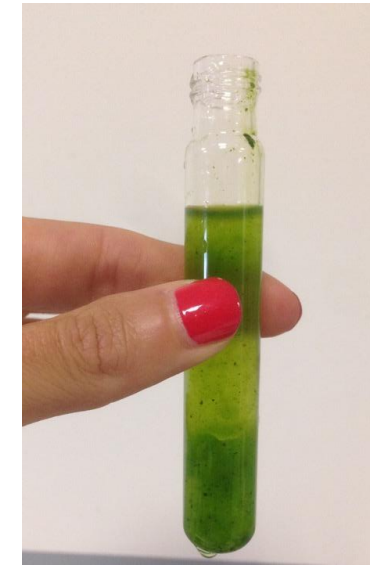
=> réduction d'un accepteur d'électrons à la lumière dans les chloroplastes

ENCPB- BCPST1 - STÉPHANIE DALAINE

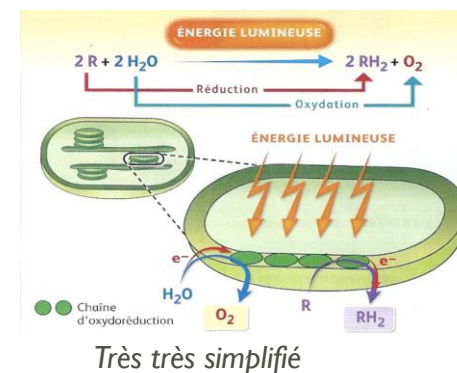


Extraction des chloroplastes après broyage de 10g de feuilles d'épinards dans 10mL de tampon phosphate saccharosé à pH 6,5

Culot obtenu après centrifugation (3000 g pendant 3 min)



Suspension de chloroplastes d'épinards



Très très simplifié

Vérification des chloroplastes au MO x600



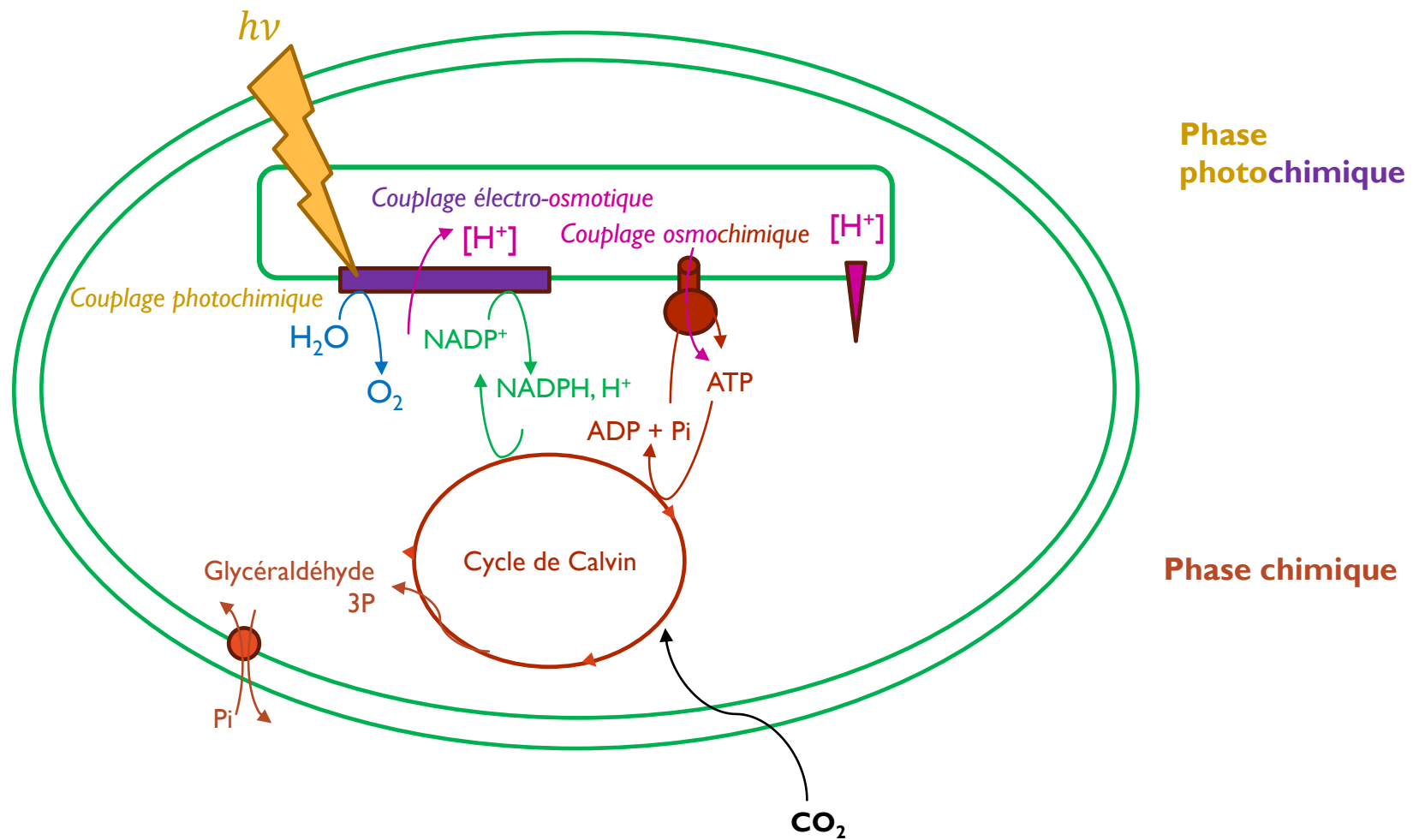
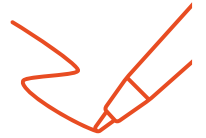
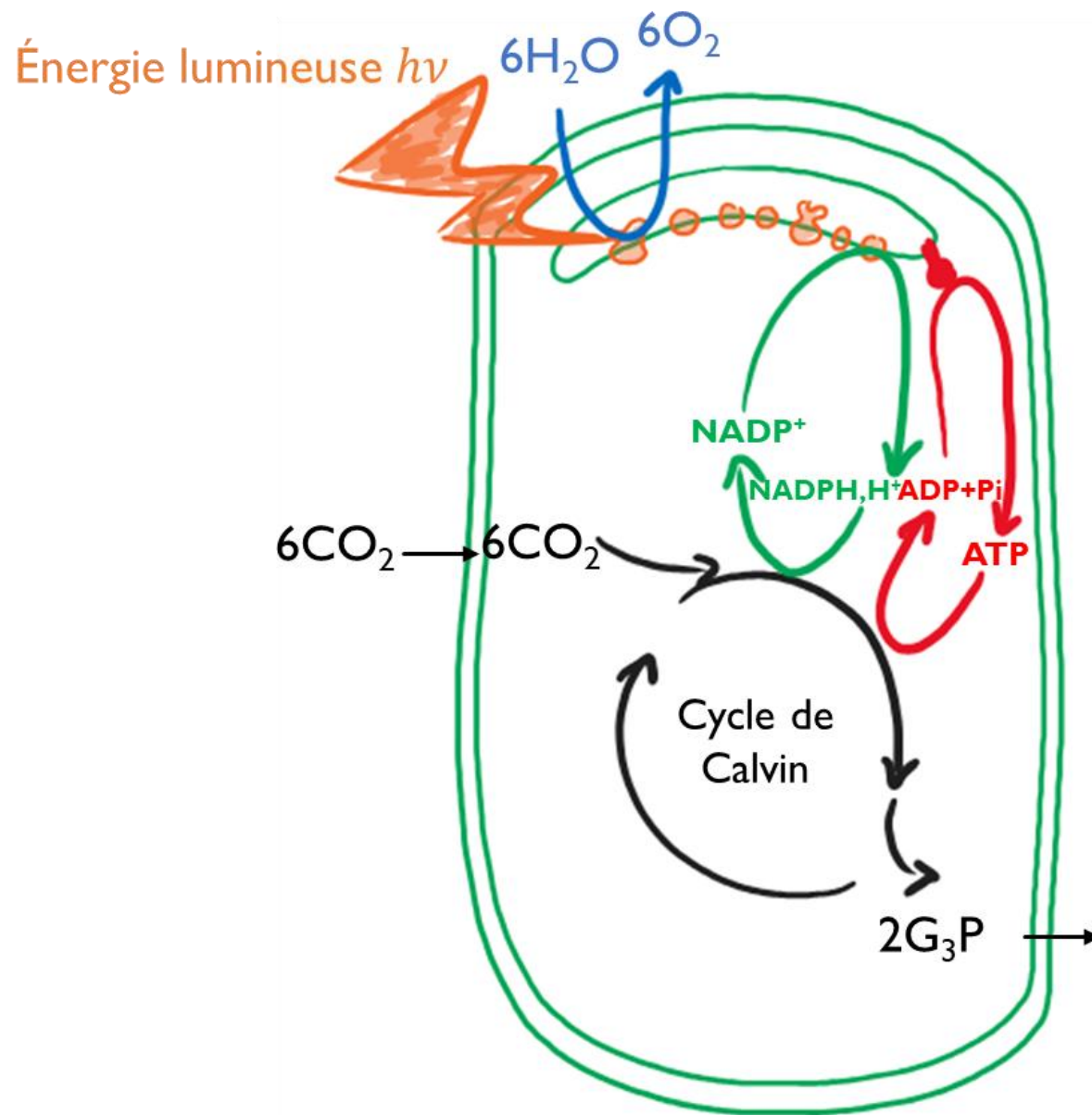


Schéma trop simplifié de l'assimilation du carbone minéral en carbone organique au sein d'un chloroplaste soumis à la lumière



## SV-E-I-A Les formes d'énergie dans la cellule

### I. Les besoins énergétiques cellulaires et leur couverture par des sources énergétiques diversifiées

- A. L'organisation fonctionnelle de l'état cellulaire est indissociable d'un flux énergétique
- B. Les principes thermodynamiques

### II. Les formes d'énergie dans la cellule

- A. Les énergies de réaction
- B. Les énergies de gradients
- C. Les énergies d'oxydo-réduction
- D. L'énergie mécanique

### III. Les couplages énergétiques

- A. Couplage chimio-osmotiques
- B. Couplage osmo-chimique
- C. Couplage osmo-osmotique
- D. Couplage chimio-chimique
- E. L'énergie de réaction permet de faire tourner un cycle

## SV-E-I-B Approvisionnement et devenir des molécules

### I. L'approvisionnement et le devenir des molécules organiques ou minérales dans les cellules

- A. La MO est nécessaire au métabolisme de la cellule
- B. Les cellules hétérotrophes prélèvent la MO
- C. Les cellules autotrophes réduisent la MN prélevée en MO

## II. La photosynthèse assure la réduction des MN en convertissant l'énergie lumineuse

- A. La photosynthèse : une réduction du C minéral
- B. Le cycle de Calvin
- C. La chaîne photosynthétique
- D. La chimiosynthèse: cas de Nitrobacter

## SV-E-IC Pièce centrale des voies du métabolisme énergétique : l'ATP, un coenzyme nucléotidique de transfert de phosphoryle

### I. L'énergie d'hydrolyse d'un coenzyme nucléotidique, l'ATP

- A. Les liaisons phosphoanhydrides
- B.  $\Delta rG^{\circ}$  et  $\Delta rG'$  d'hydrolyse de l'ATP
- C. La position intermédiaire du potentiel d'hydrolyse de l'ATP

### II. De nombreuses transformations cellulaires exploitent des transferts de phosphoryle : utilisation majeure de l'ATP

- A. Des réactions de transfert de phosphoryle
- B. Le bilan sur les transferts de phosphoryle

### III. Les couplages permettant la synthèse d'ATP

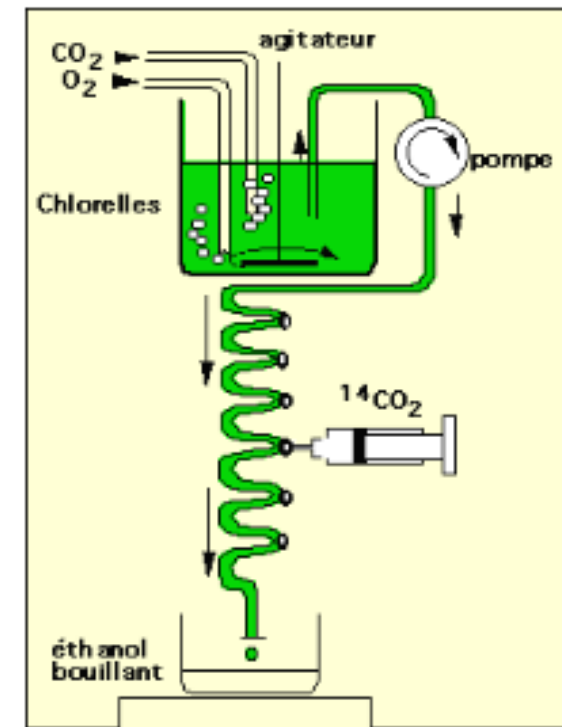
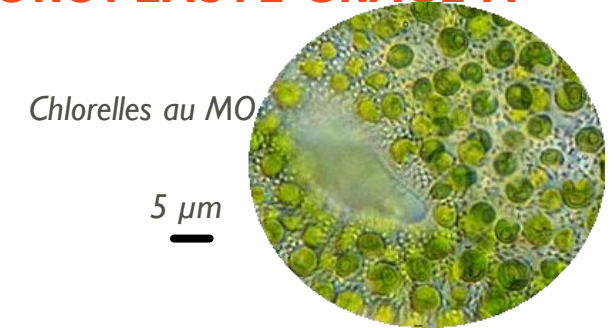
- A. La formation d'ATP par transphosphorylation
- B. La formation d'ATP par conversion d'une force protomotrice

## B. LA RÉDUCTION DES MOLÉCULES MINÉRALES CARBONÉES DANS LE CHLOROPLASTE GRÂCE À L'ÉNERGIE LUMINEUSE : LE CYCLE DE CALVIN

### I. Expériences de Calvin

#### I.1. 1ère expérience de Calvin : le phosphoglycérate, 1er produit de la phase chimiochimique

1. Dans une **suspension de chlorelles** barbote de l'air enrichi en  $\text{CO}_2$ . Les chlorelles sont refoulées par une pompe dans une tubulure transparente. Du  $^{14}\text{CO}_2$  radioactif est injecté en un **point variable** du serpentín, les chlorelles sont donc incubées durant un **temps variable** avec le  $^{14}\text{CO}_2$  marqué.
2. chlorelles sont tuées dans **l'alcool bouillant** → bloque instantanément les réactions chimiques.
3. Grâce au débit de la pompe, on calcule très précisément le temps pendant lequel les chlorelles situées dans le serpentín ont été en contact avec le  $^{14}\text{CO}_2$  radioactif avant d'être fixées par le méthanol bouillant.
4. L'expérience est réalisée pour différents points d'injection du  $^{14}\text{CO}_2$  radiomarqué dans la tubulure, donc différents temps d'incubation avec le  $^{14}\text{CO}_2$  radiomarqué.



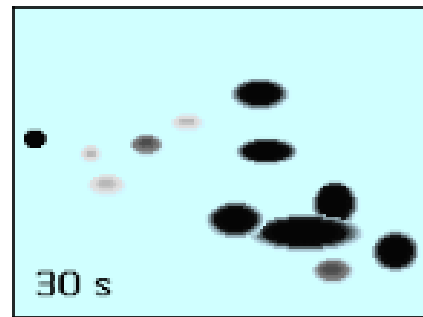
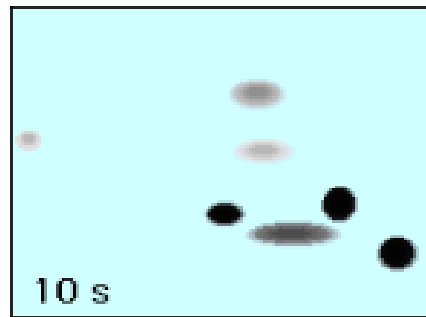
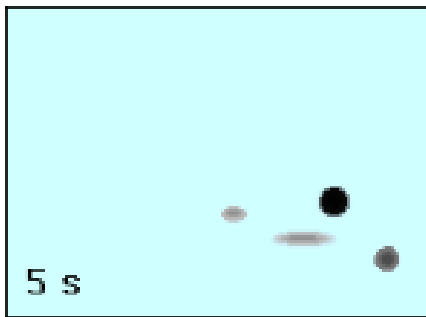
Principe et résultats de l'expérience de Calvin

## B. LA RÉDUCTION DES MOLÉCULES MINÉRALES CARBONÉES DANS LE CHLOROPLASTE GRÂCE À L'ÉNERGIE LUMINEUSE : LE CYCLE DE CALVIN

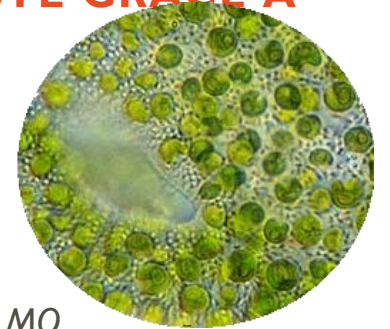
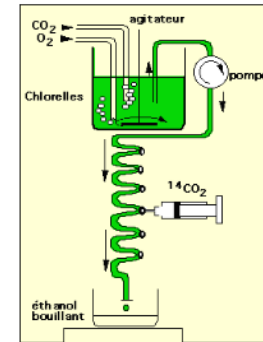
### I. Expériences de Calvin

#### I.1. 1ère expérience de Calvin : le phosphoglycérate, 1er produit de la phase chimiochimique

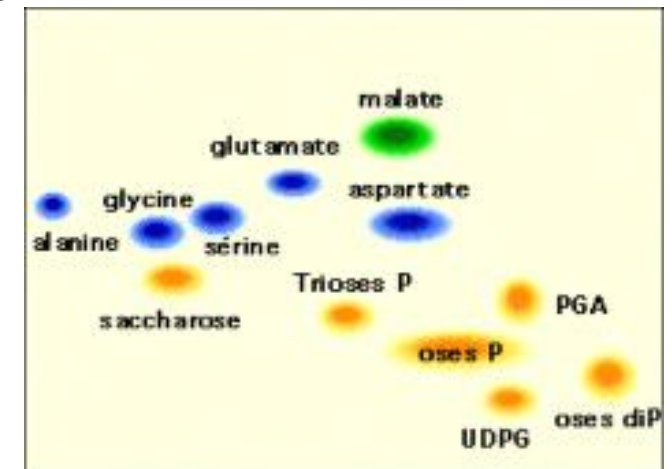
4. Pour chaque expérience, on sépare les composés formés par **chromatographie bidimensionnelle** à l'aide de deux solvants successifs (1 = mélange eau/phénol puis 2 = mélange butanol/acide propionique).
5. Puis les chromatogrammes sont révélés par **autoradiographie**.
6. Trois autoradiographies de chromatogrammes sont réalisées sur des extraits de chlorelles mises en contact avec le  $^{14}\text{CO}_2$  radioactif pendant 5 secondes, 10 secondes et 30 secondes



Chromatographies bidimensionnelles des molécules formées: révélation par autoradiographie



7. Pour identifier les composés formés, on réalise en parallèle un **chromatogramme** révélé par différents colorants spécifiques. On compare alors les chromatogrammes révélés par autoradiographie aux chromatogrammes colorés.



Chromatographie bidimensionnelle des molécules formées, révélation par des colorants spécifiques

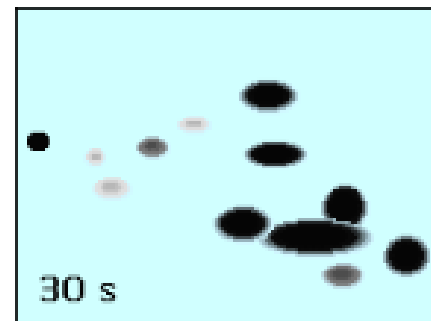
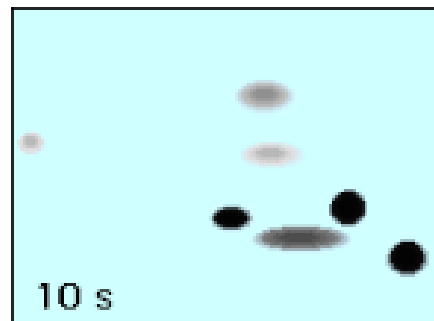
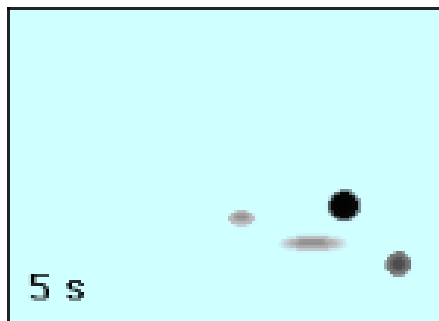
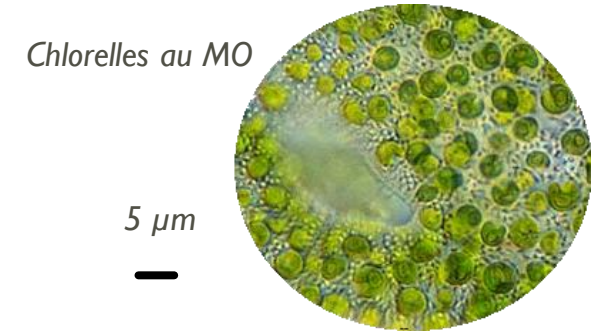
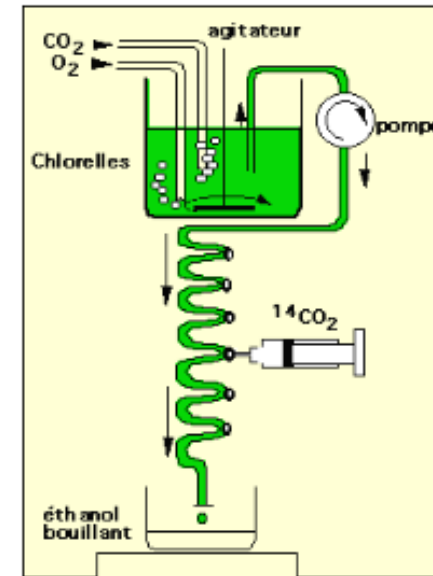
## B. LA RÉDUCTION DES MOLÉCULES MINÉRALES CARBONÉES DANS LE CHLOROPLASTE GRÂCE À L'ÉNERGIE LUMINEUSE : LE CYCLE DE CALVIN

### I. Expériences de Calvin

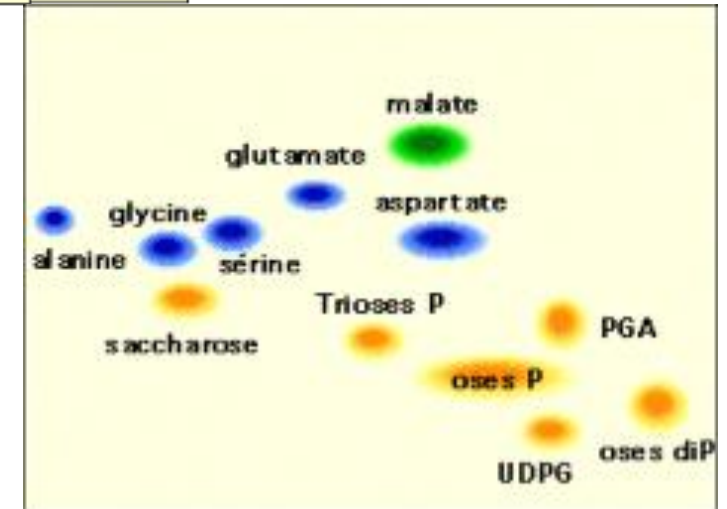
#### I.1. 1ère expérience de Calvin : le phosphoglycérate, 1er produit de la phase chimiochimique

■ Résultats :

- Le **phosphoglycérate** est la 1ère molécule formée (=3 PGA)
- Puis sont formés des **triose-phosphate** et des **oses biphosphates** dont le **Ribulose biphosphate (RuBP)**, un pentose biphosphate (ose en C5).
- Enfin sont formés des oses (comme le **saccharose**) et des **acides aminés** (et des acides organiques : malate).



Chromatographies bidimensionnelles des molécules formées: révélation par autoradiographie



Chromatographie bidimensionnelle des molécules formées, révélation par des colorants spécifiques

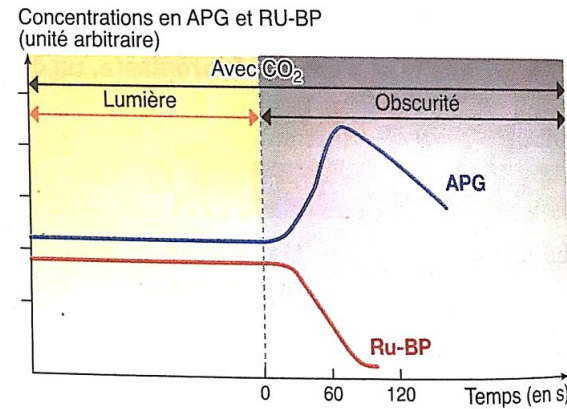
# B. LA RÉDUCTION DES MOLÉCULES MINÉRALES CARBONÉES DANS LE CHLOROPLASTE GRÂCE À L'ÉNERGIE LUMINEUSE : LE CYCLE DE CALVIN

## I. Expériences de Calvin

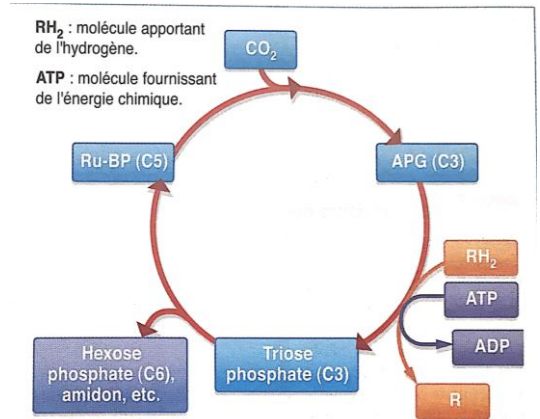
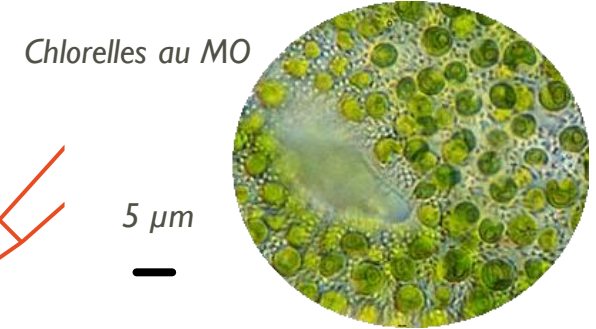
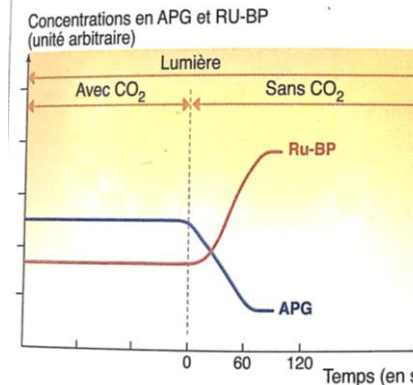
### I.2. 2ème expérience de Calvin : existence d'un cycle

- Protocole: Chlorelles en présence  $^{14}\text{CO}_2$ , à la lumière puis à l'obscurité :**
  - $\nearrow$  3 PG sans lumière et  $\searrow$  RuBP
  - => RuBP permet la formation de 3PG à l'obscurité
- Retrait du  $\text{CO}_2$ , à la lumière :**
  - ⇒  $\nearrow$  RuBP et  $\searrow$  3PG
  - ⇒ Sans  $\text{CO}_2$ , le 3PG ne peut plus se former.
  - ⇒ On suppose que le 3PG se forme à partir de RuBP en présence de  $\text{CO}_2$ .
- Cln: Il existe un cycle avec intervention de lumière et de  $\text{CO}_2$ .**

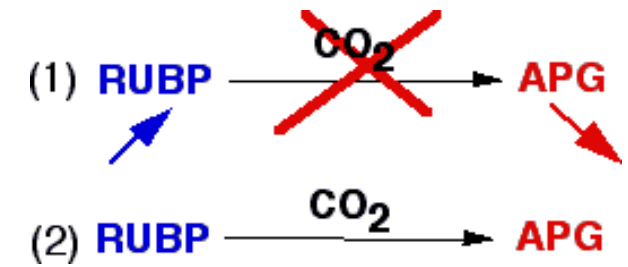
Des chlorelles sont cultivées dans un milieu où barbote de l'air enrichi en  $^{14}\text{CO}_2$  (le taux de  $\text{CO}_2$  est maintenu constant dans le milieu). La culture est placée à la lumière pendant 30 minutes, puis à l'obscurité. Des prélèvements effectués périodiquement permettent de mesurer la radioactivité de deux produits du cycle de Calvin, l'APG et le Ru-BP (voir page 19).



Dans l'expérience traduite par le graphe ci-dessous, les concentrations en APG et Ru-BP sont suivies en continu. Au temps  $t = 0$ , la culture cesse d'être approvisionnée en  $\text{CO}_2$ .



Les principales étapes du cycle établi par Calvin, Benson et Bassham.



## B. LA RÉDUCTION DES MOLÉCULES MINÉRALES CARBONÉES DANS LE CHLOROPLASTE GRÂCE À L'ÉNERGIE LUMINEUSE : LE CYCLE DE CALVIN

### 1.3. Les expériences d'Arnon, mise en évidence de l'utilisation des produits de la phase photochimique pendant la phase chimique

- Protocole: Arnon , 1958, expériences réalisées sur des fragments de chloroplastes séparés en deux fractions :
  - une fraction constituée uniquement de thylakoïdes exposés à la lumière,
  - une fraction liquide provenant du stroma et laissée à l'obscurité.
- On mesure la quantité de  $\text{CO}_2$  fixée dans le stroma en coups/min.

Conditions expérimentales	Radioactivité (en coups/min)
Stroma laissé à l'obscurité en présence de $\text{CO}_2$ radioactif	4 000
Thylakoïdes laissés à la lumière, puis mis à l'obscurité en présence de stroma toujours laissé à l'obscurité, avec du $\text{CO}_2$ radioactif	96 000
Stroma laissé à l'obscurité en présence de $\text{CO}_2$ radioactif, d'ATP et de $\text{RH}_2$	97 000

## B. LA RÉDUCTION DES MOLÉCULES MINÉRALES CARBONÉES DANS LE CHLOROPLASTE GRÂCE À L'ÉNERGIE LUMINEUSE : LE CYCLE DE CALVIN

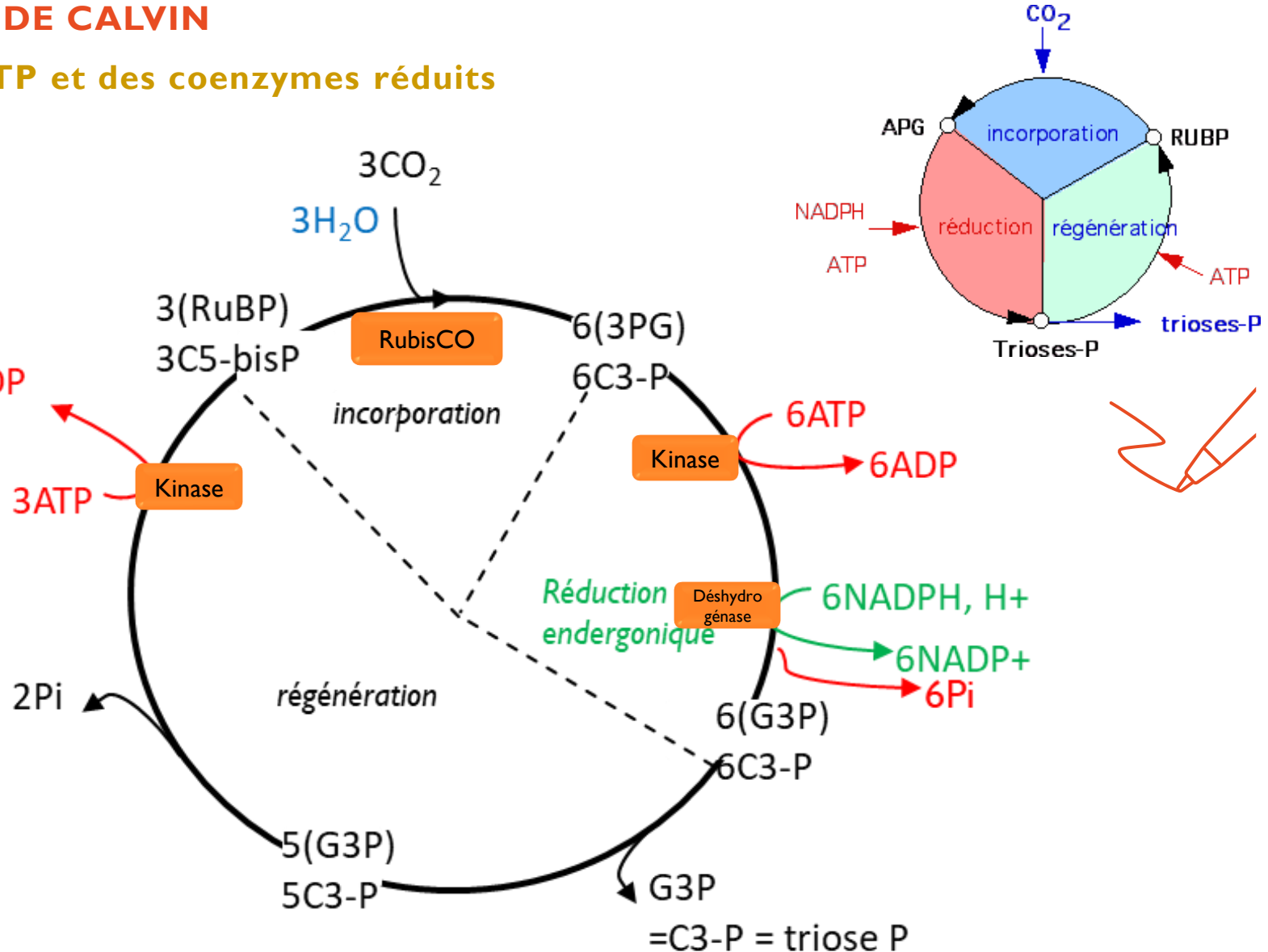
### 3. Bilan: le cycle de Calvin utilise de l'ATP et des coenzymes réduits

- 1ère étape : La carboxylation = fixation du  $\text{CO}_2$  sur le ribulose biphosphate (= incorporation)

3  $\text{CO}_2$  et 3  $\text{H}_2\text{O}$  se lient à 3 molécules de ribulose biphosphate à 5 carbones, pour former 3 molécules instables à 6 C, immédiatement hydrolysées en 6 molécules à 3 C : le 3-phosphoglycérate (3PG).

La réaction est catalysée par la Ribulose biphosphate carboxylase oxygénase = RubisCO.

Le carbone est fixé mais il est toujours oxydé ( $\text{COO}^- \leftrightarrow \text{CO}_2$ ).



## B. LA RÉDUCTION DES MOLÉCULES MINÉRALES CARBONÉES DANS LE CHLOROPLASTE GRÂCE À L'ÉNERGIE LUMINEUSE : LE CYCLE DE CALVIN

### 3. Bilan: le cycle de Calvin utilise de l'ATP et des coenzymes réduits

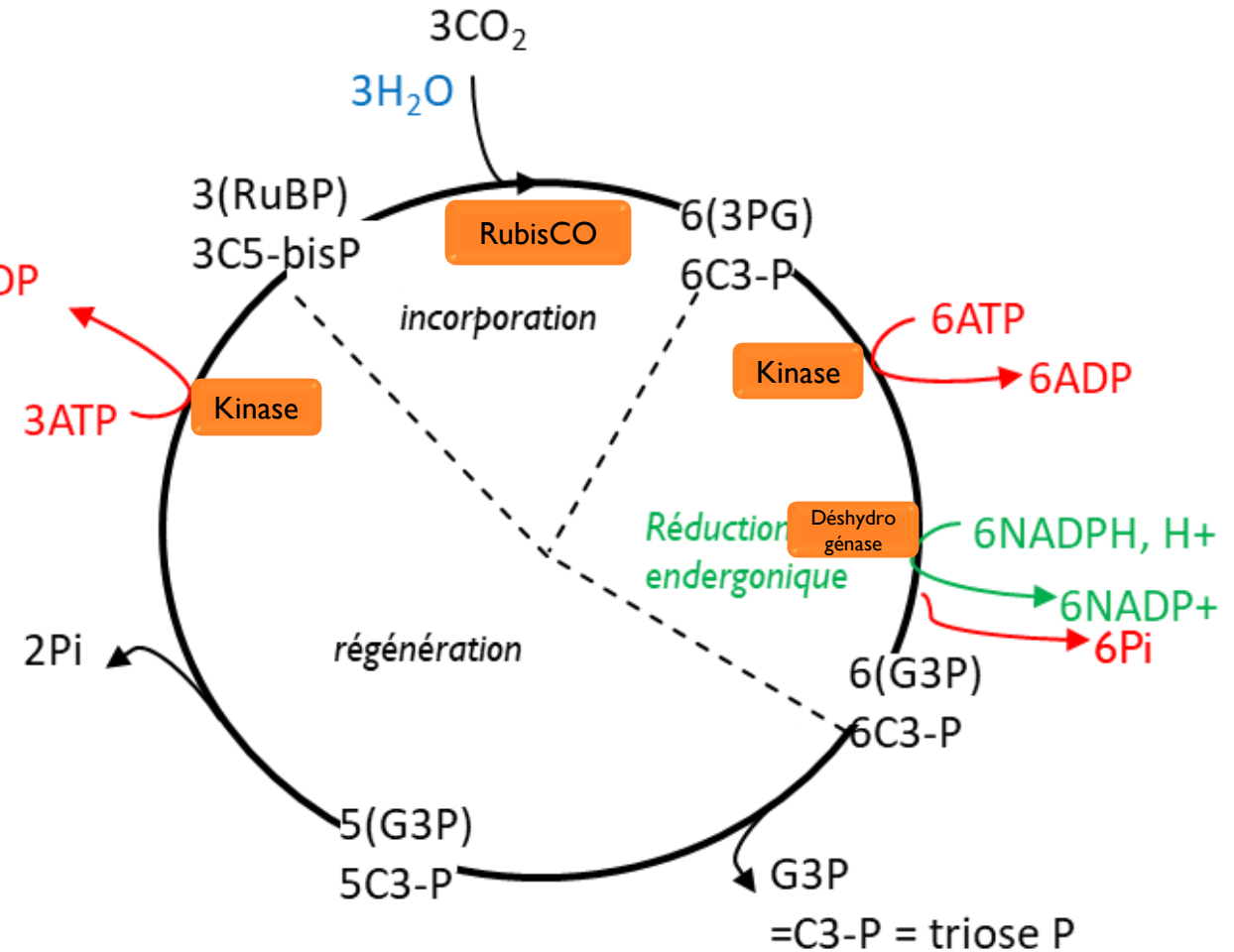
- 2ème étape : Réduction du 3-phosphoglycérate (3PG) portant le  $\text{CO}_2$  en phosphoglyceraldéhyde (G3P).

La fonction acide carboxylique ( $\text{COO}^- \leftrightarrow \text{CO}_2$ ) du phosphoglycérate est réduite en aldéhyde (phosphoglyceraldéhyde), et  $\text{NADPH, H}^+$  est oxydé en  $\text{NADP}^+$ .

Cette oxydoréduction est endergonique, donc nécessite activation préalable par l'ATP (formation d'une liaison à haut potentiel hydrolyse) : phosphoglycérate  $\rightarrow$  biphosphoglycérate.

Remarque : c'est l'étape inverse de la glycolyse (G3P donne 1,3 BPG)

1 molécule de glyceraldéhyde3-Phosphate (G3P) sort du cycle. C'est la molécule organique produite à partir d'un  $\text{CO}_2$  : elle sort du chloroplaste par un antiport avec du Pi et permettra la synthèse de glucose, etc.



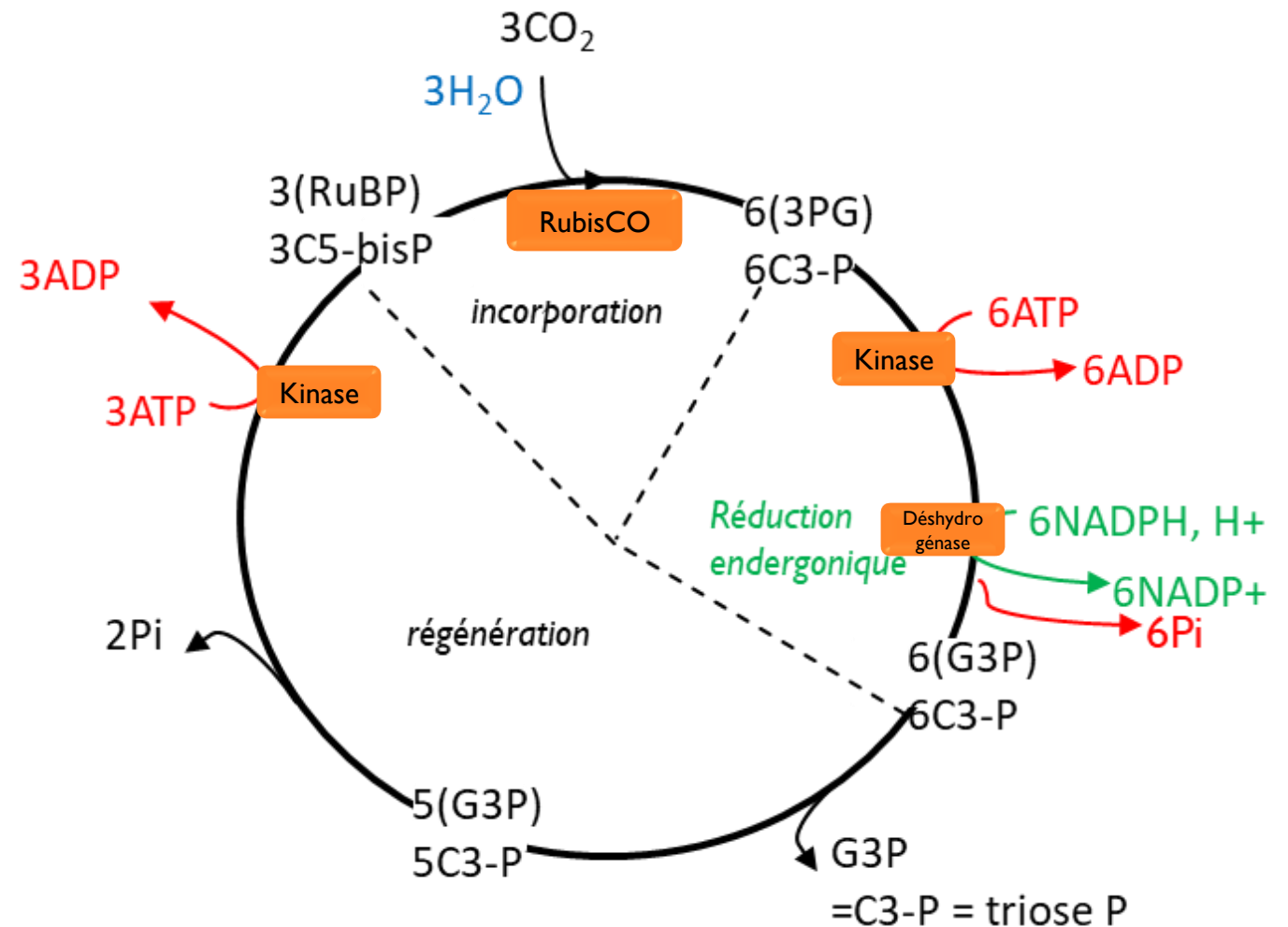
## B. LA RÉDUCTION DES MOLÉCULES MINÉRALES CARBONÉES DANS LE CHLOROPLASTE GRÂCE À L'ÉNERGIE LUMINEUSE : LE CYCLE DE CALVIN

### 3. Bilan: le cycle de Calvin utilise de l'ATP et des coenzymes réduits

#### ■ 3ème étape : Régénération du ribulose biphosphate (RuBP)

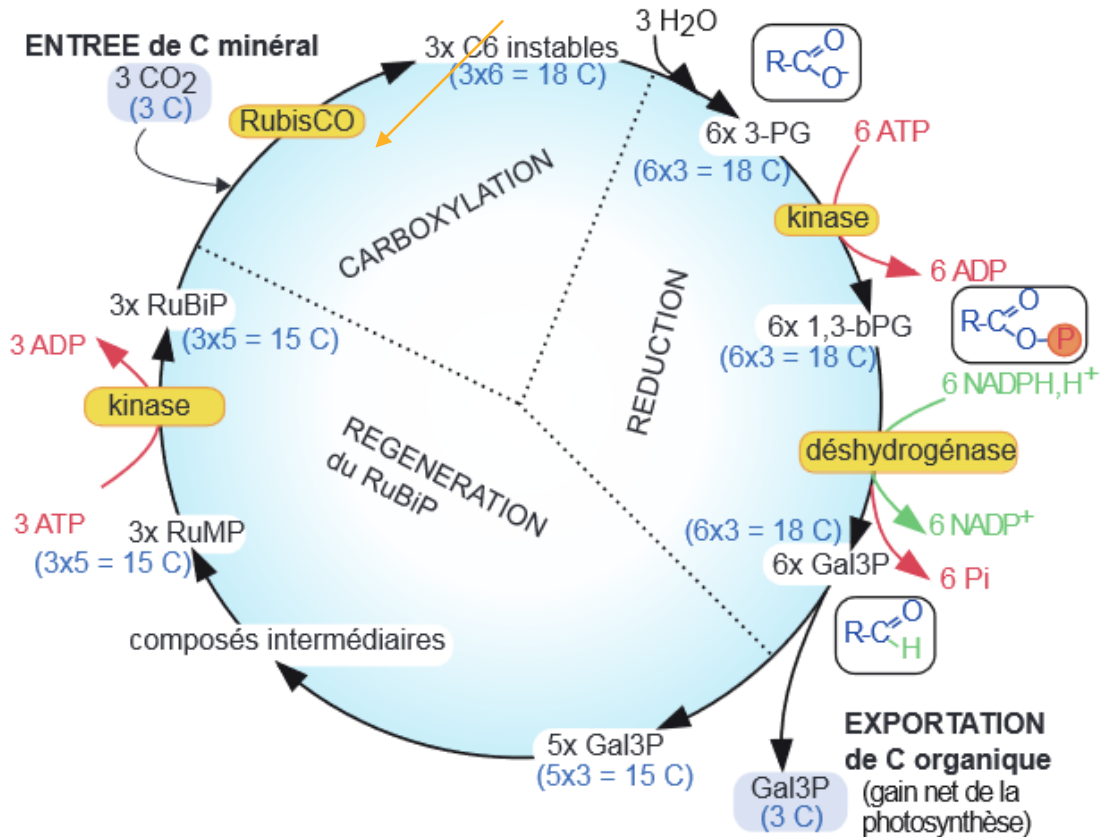
Les 5 phosphoglycéraldéhydes (5 x C3) restants sont convertis en 3 ribulose phosphate (3 x C5).

L'hydrolyse de 3 ATP permet l'activation des 3 ribuloses phosphate en 3 ribuloses biphosphate, molécule très réactive pouvant fixer le CO<sub>2</sub>. La fixation exergonique du CO<sub>2</sub> est permise par une activation préalable consommatrice d'ATP.



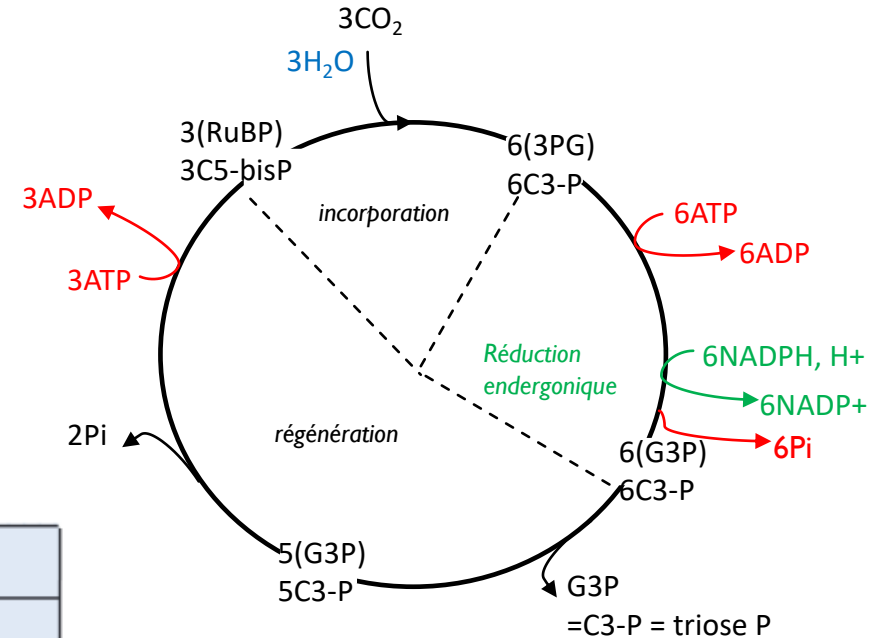
## B. LA RÉDUCTION DES MOLÉCULES MINÉRALES CARBONÉES DANS LE CHLOROPLASTE GRÂCE À L'ÉNERGIE LUMINEUSE : LE CYCLE DE CALVIN

### 3. Bilan: le cycle de Calvin utilise de l'ATP et des coenzymes réduits



Bilan de matière et d'énergie du cycle de Calvin

Entre dans le cycle	Sort du cycle	Bilan
$3 \text{ CO}_2$ = C minéral oxydé	Gal3P (C3) = C organique réduit	Réduction du C
$6 \text{ NADPH, H}^+$	$6 \text{ NADP}^+$	Oxydation des coenzymes
$9 \text{ ATP}$	$9 (\text{ADP} + \text{Pi})$	Hydrolyse d'ATP



**Figure 10.3** Cycle de Calvin : étapes et bilan de matière et d'énergie.

3-PG : 3-phosphoglycérate ; 1,3-bPG : 1,3 bisphosphoglycérate ; Gal3P : glyceraldéhyde-3-phosphate ; RuMP : ribulose monophosphate ; RuBP : ribulose 1,5 bisphosphate. Le nombre de carbones à chaque étape est indiqué en bleu.

(source Dunod, ed 2021, p.305)

## B. LA RÉDUCTION DES MOLÉCULES MINÉRALES CARBONÉES DANS LE CHLOROPLASTE GRÂCE À L'ÉNERGIE LUMINEUSE : LE CYCLE DE CALVIN

### 3. Bilan: le cycle de Calvin utilise de l'ATP et des coenzymes réduits

- La réduction du 3-PG en triose-phosphate

La fixation du  $\text{CO}_2$  sur le Ribulose 1,5-Bis-Phosphate (noté RuBiP) aboutit à la formation de 3-Phosphoglycérate (3-PG), molécule moins réduite que le Glyceraldéhyde-3P (Gal3P) qui sort du cycle. Les étapes 2 et 3 du cycle permettent alors la réduction des C3 en couplant :

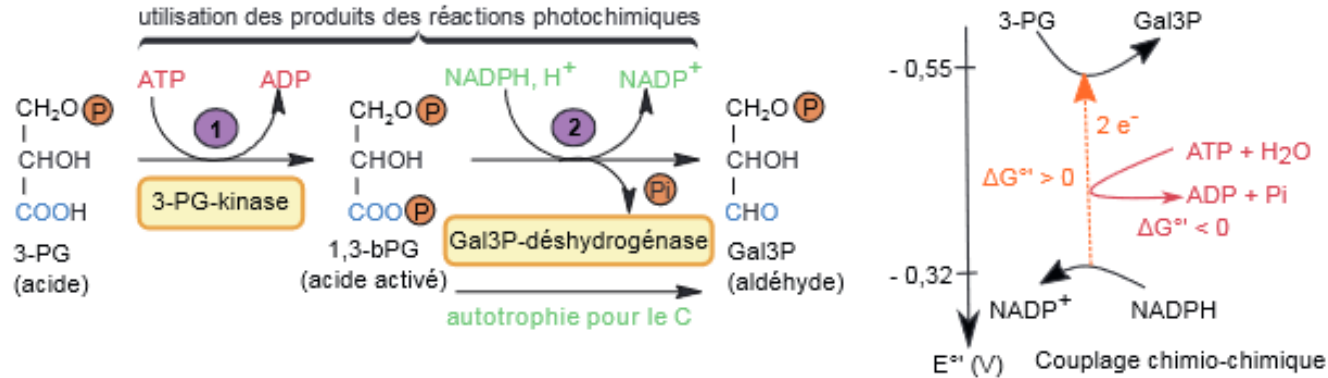


Figure 10.4 Couplage réaction redox/transphosphorylation.

=> réaction endergonique => hydrolyse de 6 ATP

- RuBisCO: Ribulose-Bis-Phosphate Carboxylase Oxygénase

- substrat de l'enzyme : le Ribulose-bis-Phosphate ;
- double activité catalytique de l'enzyme : carboxylase (vue ici) et oxygénase (qui intervient au cours de la photorespiration (voir § 5.2.))

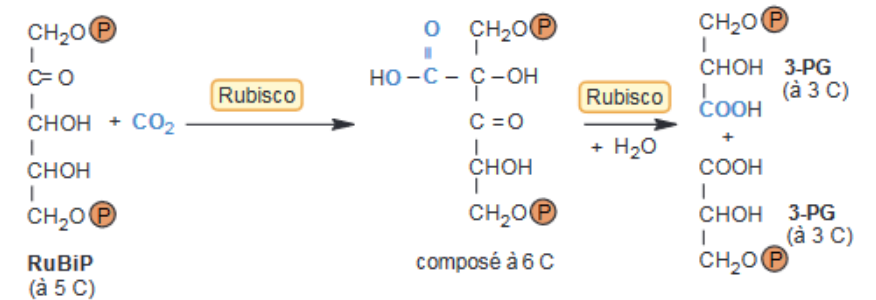
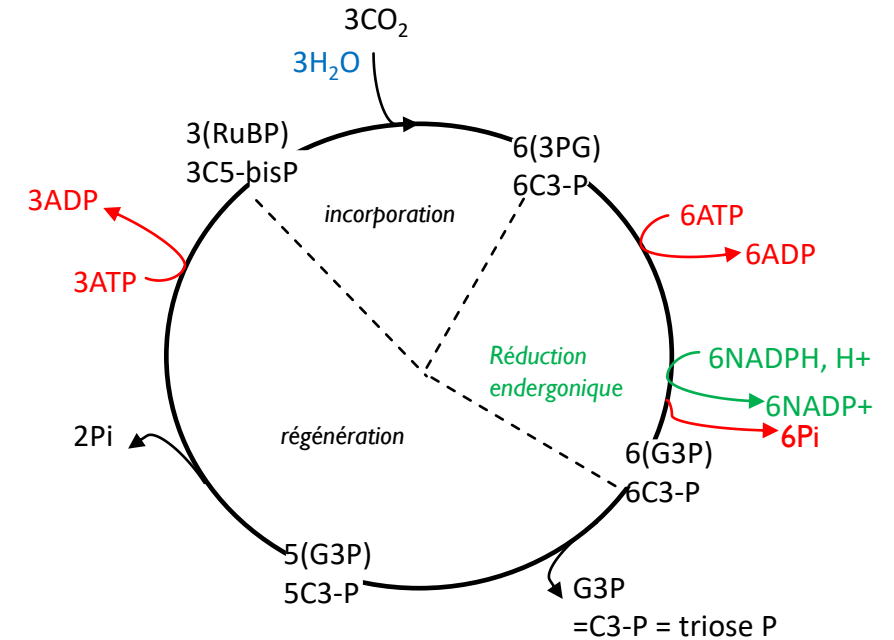


Figure 10.5 Carboxylation du RuBiP par la RubisCO.

## B. LA RÉDUCTION DES MOLÉCULES MINÉRALES CARBONÉES DANS LE CHLOROPLASTE GRÂCE À L'ÉNERGIE LUMINEUSE : LE CYCLE DE CALVIN

### 3. Le cycle de Calvin utilise de l'ATP et des coenzymes réduits

- La fixation de 3 CO<sub>2</sub>, aboutissant à la production d'un triose-phosphate, nécessite :

- 9 ATP
- 6 NADPH, H<sup>+</sup> coenzymes réduites. Ces coenzymes sont réduits à partir d'électrons issus de la molécule d'eau : la plante est lithotrophe.

Pour 1 carbone minéral fixé, il y a donc consommation de 3 ATP et 2 NADPH, H<sup>+</sup> produits par la phase photochimique, avec utilisation de 10 photons (700 nm) représentant 1710 kJ.mol<sup>-1</sup>

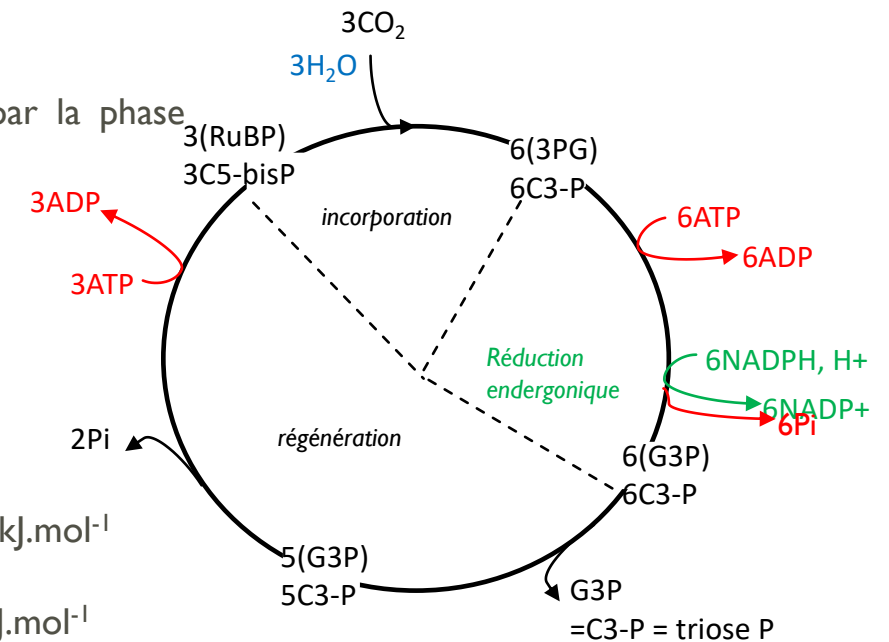
On a donc :

- $$\text{CO}_2 + 3 \text{ATP} + 2 \text{NADPH, H}^+ \rightleftharpoons \text{CH}_2\text{O} + 3 \text{ADP} + 3 \text{Pi} + 2 \text{NADP}^+ \quad \Delta G^{\circ'} = -51,5 \text{ kJ.mol}^{-1}$$
- $$\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{CH}_2\text{O} + \text{O}_2 \quad \Delta G^{\circ'} = + 480 \text{ kJ.mol}^{-1}$$
- $$3 \text{ATP} \rightleftharpoons 3 \text{ADP} + 3 \text{Pi} \quad \Delta G^{\circ'} = 3 \times (-30,5) = - 91,5 \text{ kJ.mol}^{-1}$$
- $$2 \text{NADPH, H}^+ + \text{O}_2 \rightleftharpoons 2 \text{NADP}^+ + 2 \text{H}_2\text{O} \quad \Delta G^{\circ'} = 2 \times (-220) = - 440 \text{ kJ.mol}^{-1}$$

Seulement 480 kJ.mol<sup>-1</sup> de l'énergie correspondant aux dix photons sont mis en réserve dans les photosynthétats, ce qui représentent un rendement de  $480/1710 = 0,28$  soit 28%.

**Bilan : la cellule végétale chlorophyllienne est donc photolithotrophe.**

+	-
×	÷

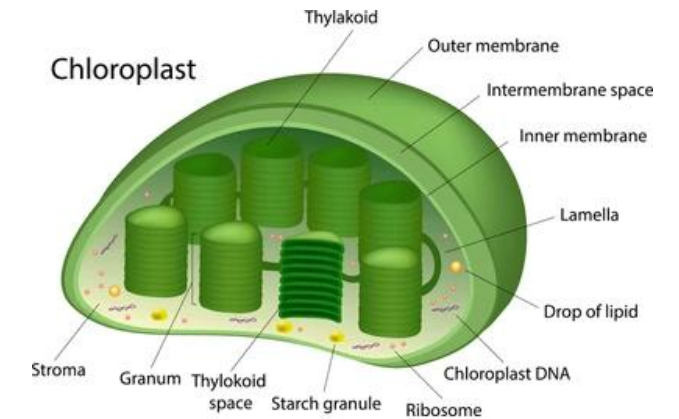


## B. LA RÉDUCTION DES MOLÉCULES MINÉRALES CARBONÉES DANS LE CHLOROPLASTE GRÂCE À L'ÉNERGIE LUMINEUSE : LE CYCLE DE CALVIN

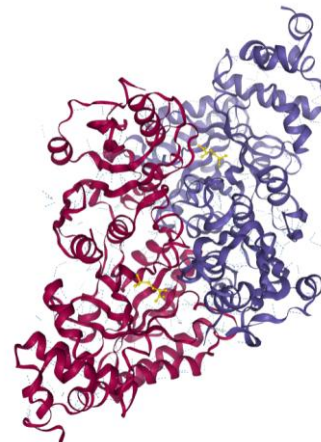
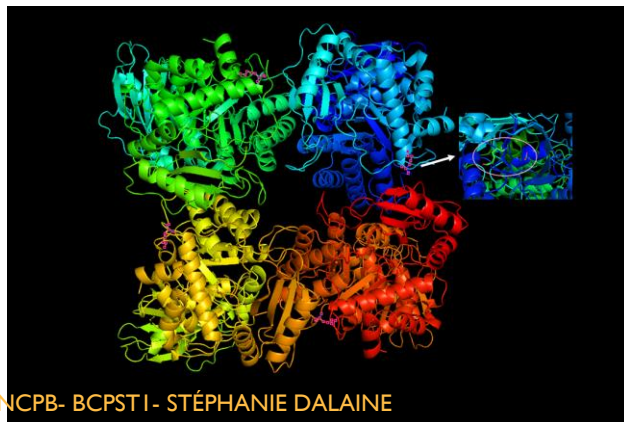
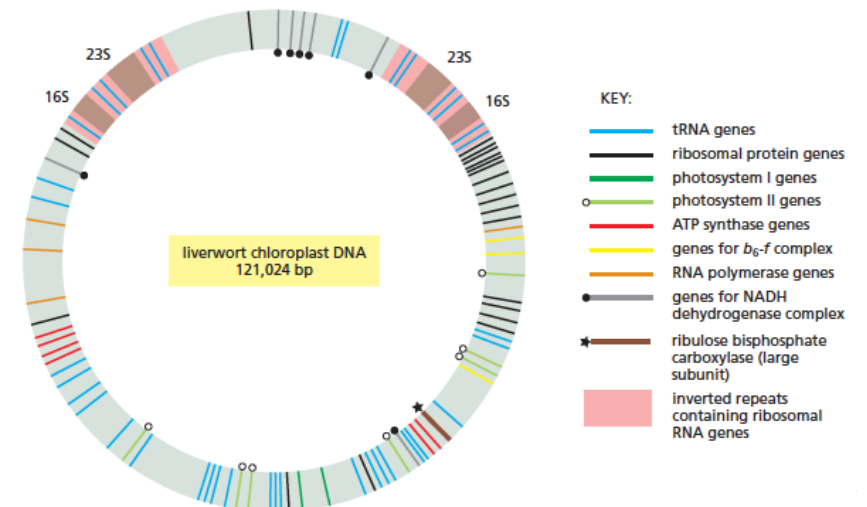
### 4. La RuBisCO : une enzyme michaelienne contrôlée

- RubisCO : **protéine** la plus abondante de la biosphère; catalyse l'entrée du carbone minéral dans les réseaux trophiques.
- Structure de la RubisCO = enzyme polymérique :
  - 8 grandes sous-unités codées par le génome chloroplastique (L = large)
  - 8 petites sous-unités codées par le génome nucléaire. (S = small)
  - L'assemblage des sous-unités a lieu dans le chloroplaste grâce à des protéines chaperonnes.
- La RubisCO est une **enzyme polymérique**, mais pas de coopération ni de contrôle allostérique, c'est donc une **enzyme michaelienne**.

### Localisation de l'ADN d'un chloroplaste



- ADN circulaire double brin
- Nombreuses copies du chromosome
- Localisation : dans le stroma
- Taille : 70-200 kb
- Peu de gènes encodés, comparés au génome nucléaire.



## B. LA RÉDUCTION DES MOLÉCULES MINÉRALES CARBONÉES DANS LE CHLOROPLASTE GRÂCE À L'ÉNERGIE LUMINEUSE : LE CYCLE DE CALVIN

### 4. La RuBisCO : une enzyme michaelienne contrôlée

- Effet du pH

La RubisCO a une activité optimale à pH = 8 (pH optimal).

Les enzymes du cycle de Calvin sont donc actives quand la phase photochimique fonctionne et permet un pH stroma = 8.

- Effet du CO<sub>2</sub>

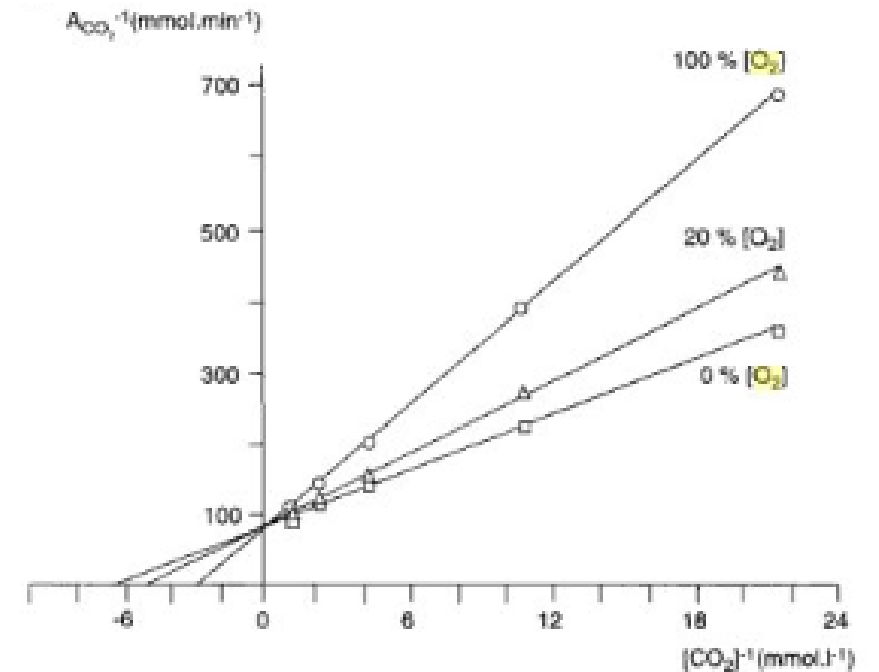
La RubisCO est activée par une forte pression partielle en CO<sub>2</sub>.

Une molécule de CO<sub>2</sub> dans le site actif joue le rôle d'activateur, tandis qu'une autre molécule de CO<sub>2</sub> est le substrat. La molécule de CO<sub>2</sub> activateur est liée à la RubisCO le jour → enzyme activée le jour.

- **O<sub>2</sub> inhibiteur compétitif du CO<sub>2</sub>** : compétition pour le **même site actif**

On constate qu'avec  $\nearrow$  [O<sub>2</sub>], la vitesse initiale ne change pas mais le Km  $\nearrow$

- ⇒ l'affinité de l'enzyme pour CO<sub>2</sub>  $\searrow$
- ⇒ l'O<sub>2</sub> est un inhibiteur compétitif du CO<sub>2</sub> pour la fixation au site actif de la RuBisCO



Effet de O<sub>2</sub> sur l'activité carboxylase de la RuBisCO (expc Ogren et Bowes, 1971 sur une préparation de RuBisCO en présence de 0,1 mM de RuBP) représentation en double inverse de Lineweaver Burk

## B. LA RÉDUCTION DES MOLÉCULES MINÉRALES CARBONÉES DANS LE CHLOROPLASTE GRÂCE À L'ÉNERGIE LUMINEUSE : LE CYCLE DE CALVIN

### 5. La dualité du fonctionnement de la RuBisCO dans les plantes en C3 et la photorespiration

#### 5.1. Mise en évidence de la photorespiration : inhibition de la photosynthèse par le dioxygène

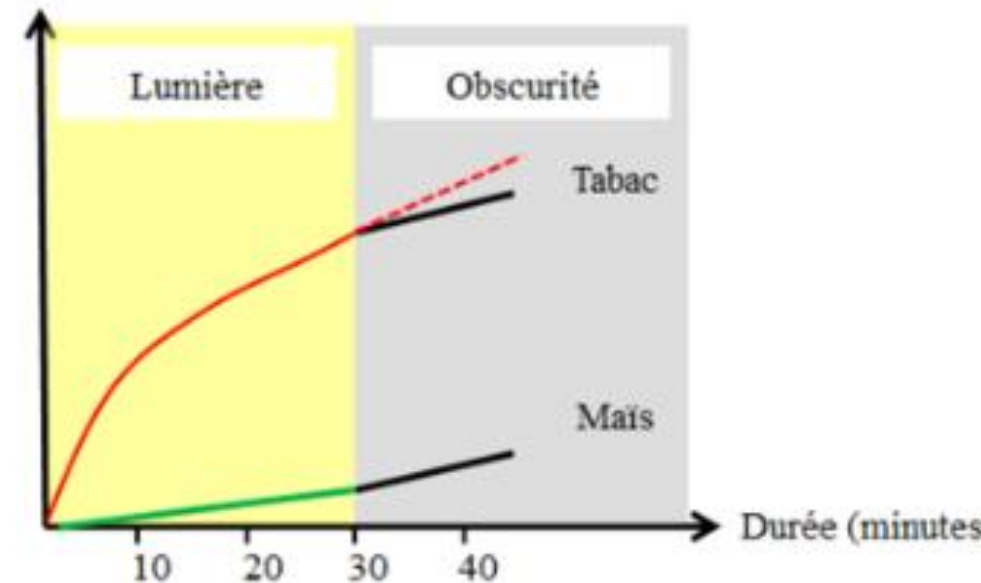
- Protocole: Des fragments de feuilles de **tabac (plante en C3)** et de **maïs (plantes en C4)** sont d'abord placés, sous éclairage, en présence de  $^{14}\text{CO}_2$  pendant un certain temps. Le matériel biologique est ensuite transféré dans un environnement sans  $\text{CO}_2$ , à la lumière puis à l'obscurité, l'on compare alors le rejet de  $^{14}\text{CO}_2$ .

- L'expérience est réalisée sur deux types de plante : le **tabac (plante en C3)** et le **maïs (plantes en C4)**.

- Résultats:

- A l'obscurité, les deux types de plantes dégagent du dioxyde carbone correspondant à leur activité respiratoire, celle-ci est comparable puisque les pentes (courbes noires) sont voisines.

Dégagement de  $^{14}\text{CO}_2$   
(coups/min)



Mise en évidence expérimentale de la photorespiration (in Segarra et al., Ellipses)

Des fragments de feuilles de tabac (plante en C3) et de maïs (plantes en C4) sont d'abord placés, sous éclairage, en présence de  $^{14}\text{CO}_2$  pendant un certain temps. Le matériel biologique est ensuite transféré dans un environnement sans  $\text{CO}_2$ , à la lumière puis à l'obscurité, l'on compare alors le rejet de  $^{14}\text{CO}_2$ .

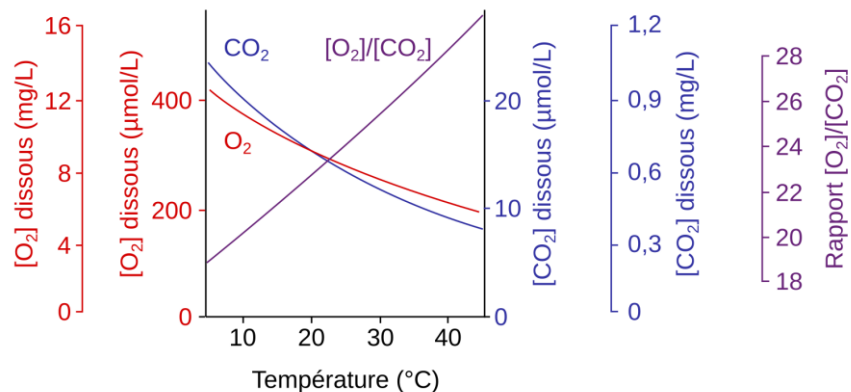
## B. LA RÉDUCTION DES MOLÉCULES MINÉRALES CARBONÉES DANS LE CHLOROPLASTE GRÂCE À L'ÉNERGIE LUMINEUSE : LE CYCLE DE CALVIN

### 5. La dualité du fonctionnement de la RuBisCO dans les plantes en C3 et la photorespiration

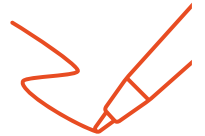
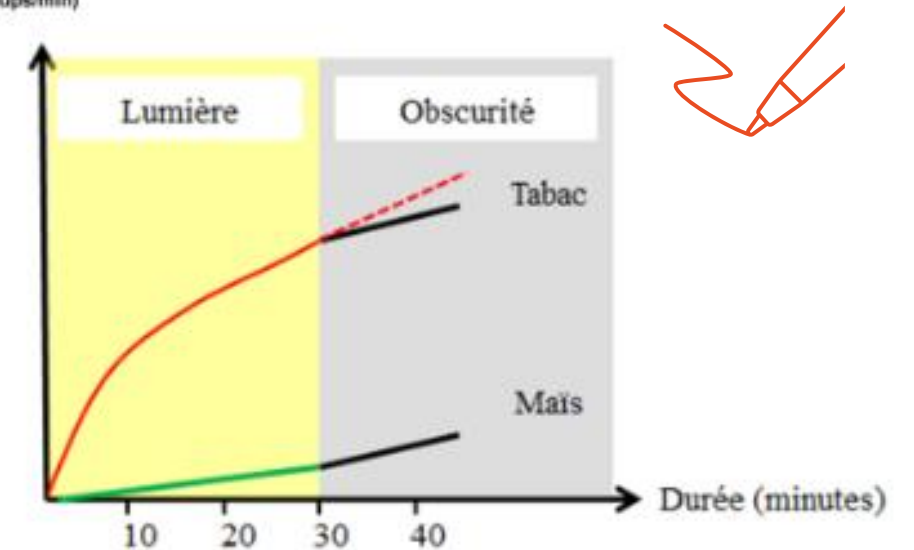
#### 5.1. Mise en évidence de la photorespiration : inhibition de la photosynthèse par le dioxygène

##### ■ Résultats:

- A la lumière, la comparaison des deux plantes montre que le tabac présente un plus fort rejet de  $^{14}\text{CO}_2$  contrairement au maïs. On parle alors de **photorespiration** puisque ce phénomène rejette du  $\text{CO}_2$  et qu'il a lieu en présence de lumière.
- Lien avec les conditions naturelles? Lors d'une élévation de température foliaire, en début d'après-midi par exemple, la solubilité du dioxygène décroît moins vite que celle du dioxyde de carbone, favorisant alors la présence du dioxygène à proximité de la RubisCO qui fonctionne sur le mode oxygénase.



Dégagement de  $^{14}\text{CO}_2$   
(coups/min)



Mise en évidence expérimentale de la photorespiration (in Segarra et al., Ellipses)

Des fragments de feuilles de tabac (plante en C3) et de maïs (plantes en C4) sont d'abord placés, sous éclairage, en présence de  $^{14}\text{CO}_2$  pendant un certain temps. Le matériel biologique est ensuite transféré dans un environnement sans  $\text{CO}_2$ , à la lumière puis à l'obscurité, l'on compare alors le rejet de  $^{14}\text{CO}_2$ .

- Cette expérience montre que les plantes en C4 ne réalisent pas la photorespiration.

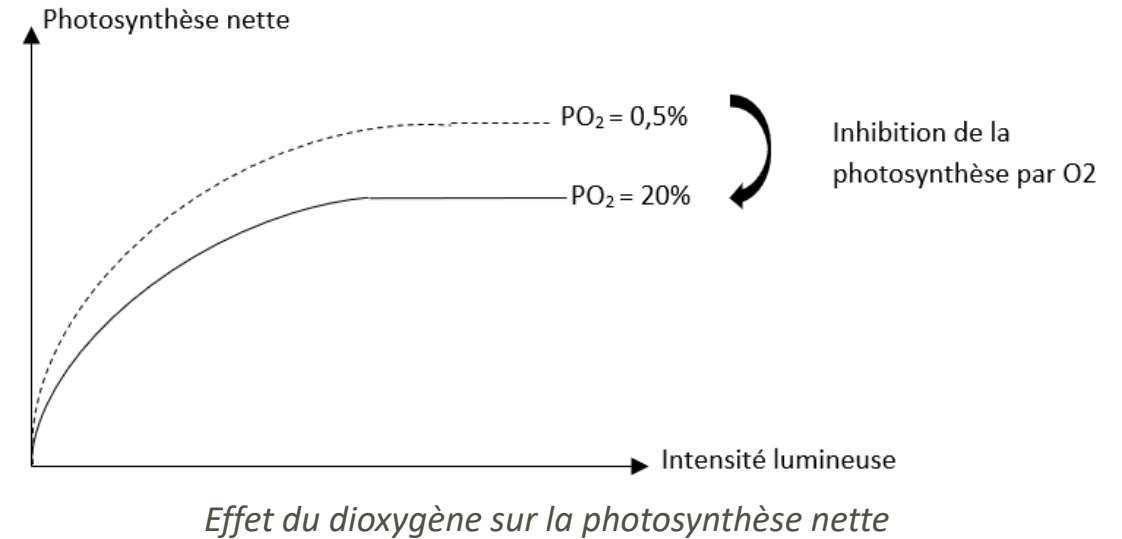
## B. LA RÉDUCTION DES MOLÉCULES MINÉRALES CARBONÉES DANS LE CHLOROPLASTE GRÂCE À L'ÉNERGIE LUMINEUSE : LE CYCLE DE CALVIN

### 5. La dualité du fonctionnement de la RuBisCO dans les plantes en C3 et la photorespiration

#### 5.2. La double activité de la RuBisCO : activité carboxylase et activité oxygénase

- RuBisCO: **R**ibulose-**B**is-Phosphate **C**arboxylase **O**xygénase
  - substrat de l'enzyme : le Ribulose-bis-Phosphate ;
  - **double activité catalytique de l'enzyme : carboxylase** (vue ici) et **oxygénase** (qui intervient au cours de la photorespiration)
  - Carboxylation lorsque  $PCO_2$  élevée
  - Oxygénation lorsque  $PCO_2$  faible et/ou  $PO_2$  élevée
  - Affinité pour **3 substrats: RuBP,  $CO_2$ ,  $O_2$**
  
- Fonctionnement de la RuBisCO en été:
 

**matin et soir** →  $T^\circ C$  faible → **stomates ouverts** : la  **$PCO_2$  dans la feuille est forte** → **activité carboxylase** et donc fixation de  $CO_2$ .
  
- Aux heures chaudes, les **stomates sont fermés**, ce qui évite limite les pertes d'eau par évapotranspiration : la  **$PCO_2$  dans la feuille est faible** → activité **Oxygénase = photorespiration**.
  - Dans ce cas :  $RuBP + O_2 \rightarrow 3$  phosphoglycérate + glycolate.
  - Le glycolate (molécule à 2 carbones) est ensuite oxydé et décarboxylé dans 2 autres compartiments cellulaires : le **peroxysome et la mitochondrie**.



Teneur en gaz	Activité de la RubisCO	Réaction catalysée	→ Voie métabolique
<b><math>PCO_2</math> forte</b>	Activité Carboxylase	Carboxylation : $RuBP + CO_2 \rightarrow$ phosphoglycérate	→ Photosynthèse
<b><math>PO_2</math> forte</b>	Activité Oxygénase	Oxygénation : $RuBP + O_2 \rightarrow$ Phosphoglycérate + glycolate = molécule à 2 carbones + libération de $CO_2$	→ Photorespiration

## B. LA RÉDUCTION DES MOLÉCULES MINÉRALES CARBONÉES DANS LE CHLOROPL. GRÂCE À L'ÉNERGIE LUMINEUSE : LE CYCLE DE CALVIN

### 5. La dualité du fonctionnement de la RuBisCO dans les plantes en C3 et la photorespiration

#### 5.2. La double activité de la RuBisCO : activité carboxylase et activité oxygénase

##### ■ Fonctionnement de la RuBisCO en été:

➤ matin et soir → T°C faible → stomates ouverts → P<sub>CO<sub>2</sub></sub> dans la feuille forte → activité carboxylase → fixation de CO<sub>2</sub>.

➤ midi → T°C élevée → les stomates fermés → limite pertes hydriques par évapotranspiration mais P<sub>CO<sub>2</sub></sub> faible → activité Oxygénase = **photorespiration**.

✓ RuBP + O<sub>2</sub> → 2 phosphoglycérate + 2 P-glycolate.

✓ glycolate (molécule à 2 carbones) → oxydé et décarboxylé dans 2 autres compartiments cellulaires : le **peroxysome** et la **mitochondrie**

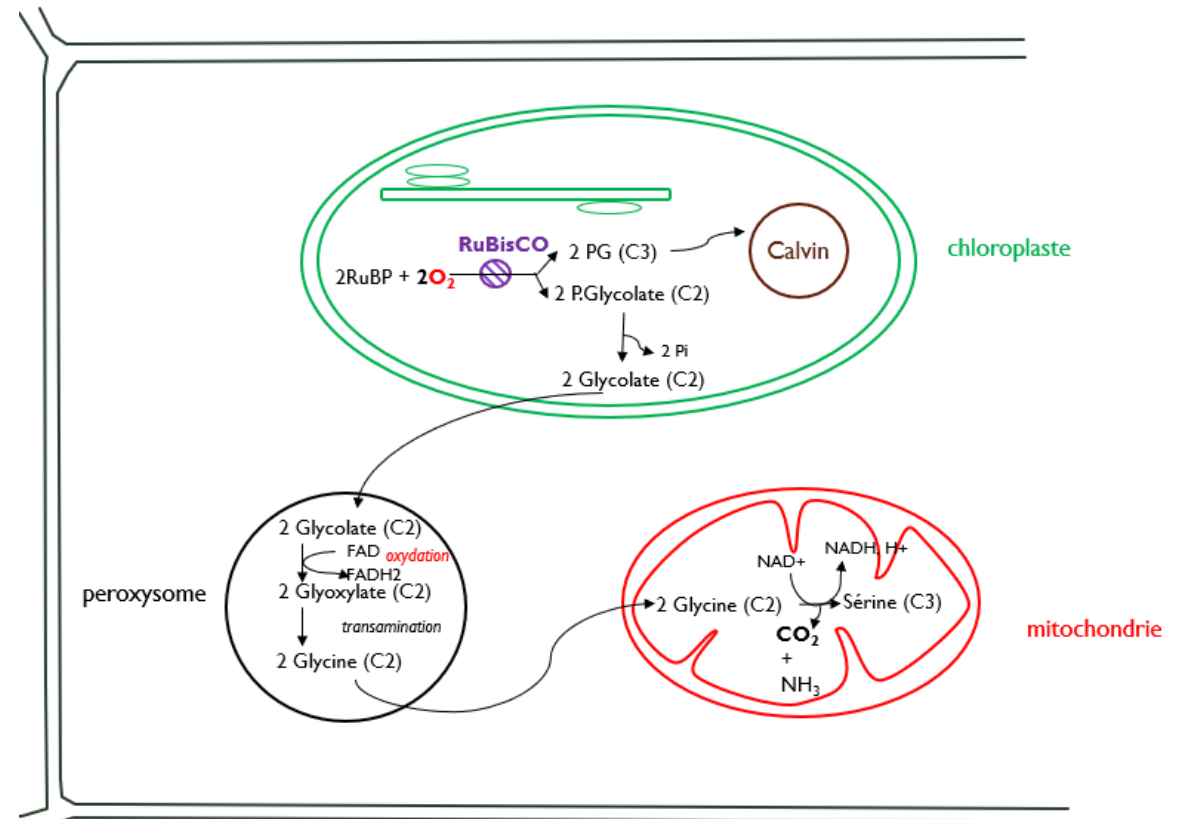
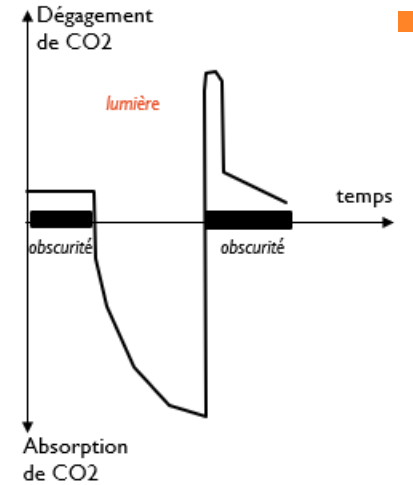
✓ **Coopération entre 3 organites: chloroplaste + mitochondrie + peroxysome**

✓ **Aucune production d'ATP**

✓ Photosynthèse (perte de rendement jusqu'à 50%)

✓ Mais production d'AA: **glycine et sérine**

✓  $\searrow$  PO<sub>2</sub> →  $\searrow$  formation des anions superoxyde néfastes



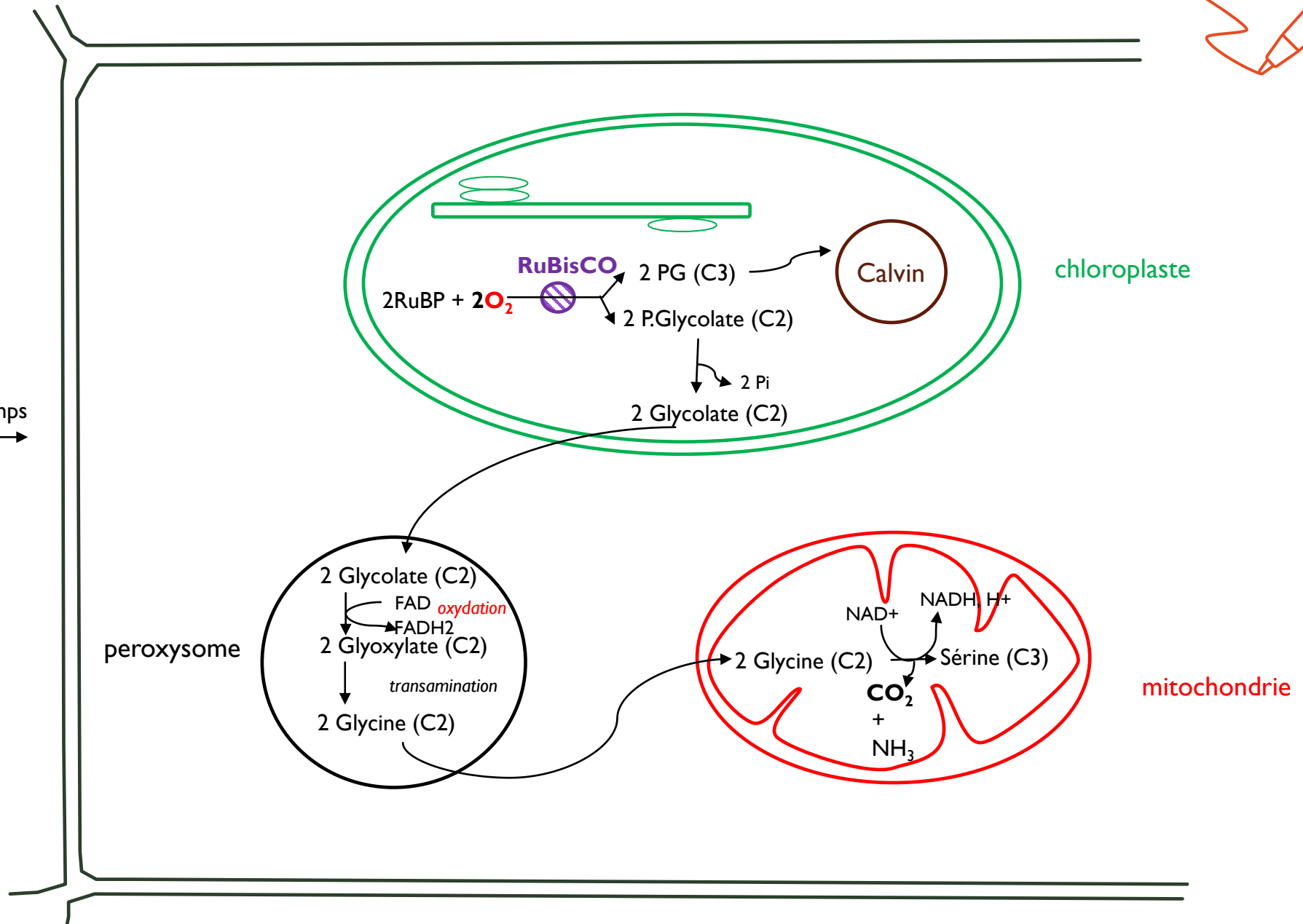
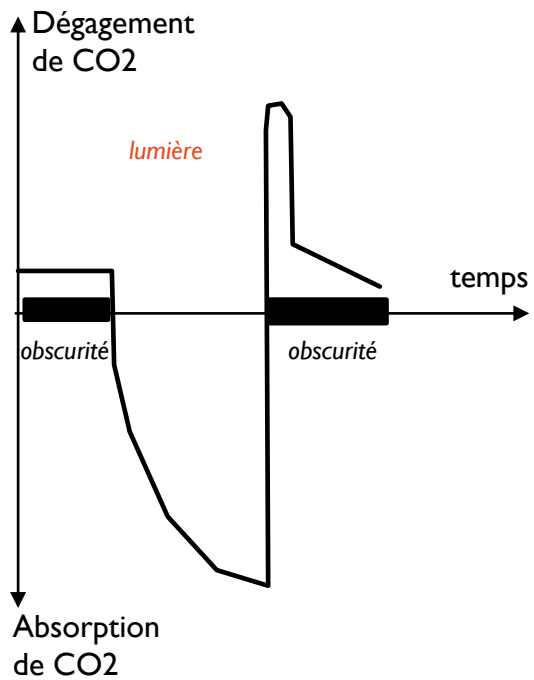


Schéma de la photorespiration

## SV-E-I-A Les formes d'énergie dans la cellule

### I. Les besoins énergétiques cellulaires et leur couverture par des sources énergétiques diversifiées

- A. L'organisation fonctionnelle de l'état cellulaire est indissociable d'un flux énergétique
- B. Les principes thermodynamiques

### II. Les formes d'énergie dans la cellule

- A. Les énergies de réaction
- B. Les énergies de gradients
- C. Les énergies d'oxydo-réduction
- D. L'énergie mécanique

### III. Les couplages énergétiques

- A. Couplage chimio-osmotiques
- B. Couplage osmo-chimique
- C. Couplage osmo-osmotique
- D. Couplage chimio-chimique
- E. L'énergie de réaction permet de faire tourner un cycle

## SV-E-I-B Approvisionnement et devenir des molécules

### I. L'approvisionnement et le devenir des molécules organiques ou minérales dans les cellules

- A. La MO est nécessaire au métabolisme de la cellule
- B. Les cellules hétérotrophes prélèvent la MO
- C. Les cellules autotrophes réduisent la MN prélevée en MO

## II. La photosynthèse assure la réduction des MN en convertissant l'énergie lumineuse

- A. La photosynthèse : une réduction du C minéral
- B. Le cycle de Calvin
- C. La chaîne photosynthétique
- D. La chimiosynthèse: cas de Nitrobacter

## SV-E-IC Pièce centrale des voies du métabolisme énergétique : l'ATP, un coenzyme nucléotidique de transfert de phosphoryle

### I. L'énergie d'hydrolyse d'un coenzyme nucléotidique, l'ATP

- A. Les liaisons phosphoanhydrides
- B.  $\Delta rG^{\circ}$  et  $\Delta rG'$  d'hydrolyse de l'ATP
- C. La position intermédiaire du potentiel d'hydrolyse de l'ATP

### II. De nombreuses transformations cellulaires exploitent des transferts de phosphoryle : utilisation majeure de l'ATP

- A. Des réactions de transfert de phosphoryle
- B. Le bilan sur les transferts de phosphoryle

### III. Les couplages permettant la synthèse d'ATP

- A. La formation d'ATP par transphosphorylation
- B. La formation d'ATP par conversion d'une force protomotrice

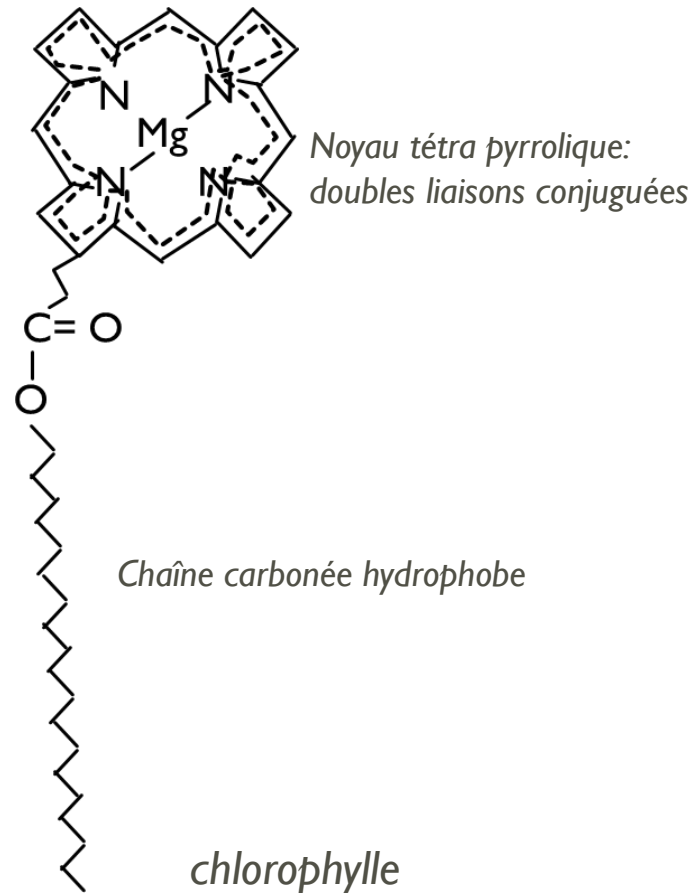
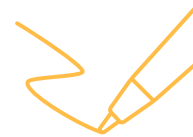
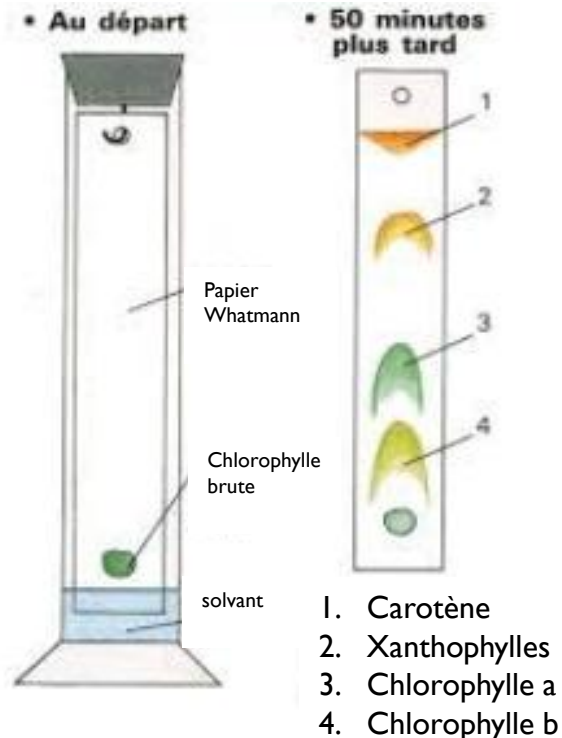
## C. LA CHAÎNE PHOTOSYNTHÉTIQUE CONVERTIT L'ÉNERGIE LUMINEUSE EN ÉNERGIE CHIMIQUE (POUVOIR REDUCTEUR)

### I. Les membranes des thylakoïdes possèdent des pigments photosynthétiques

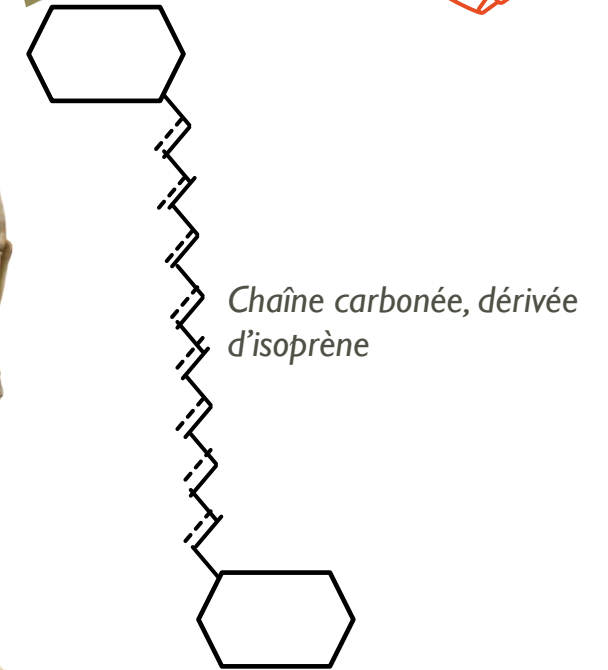
#### I.1. Nature et propriété des pigments photosynthétiques

- Mise en évidence des pigments par chromatographie sur couche mince:

- Choix de l'éluant
- Éluant organique hydrophobe



Tétra pyrrolique,  
comme la  
protoporphyrine de  
l'hème de globine?



Pigments caroténoïdes ( $\beta$ carotène et  
xanthophylle)

Pigments hydrophobes  
=> enchâssés dans la mb  
des thylakoïdes

# C. LA CHAÎNE PHOTOSYNTHÉTIQUE CONVERTIT L'ÉNERGIE LUMINEUSE EN ÉNERGIE CHIMIQUE (POUVOIR REDUCTEUR)

## I. Les membranes des thylakoïdes possèdent des pigments photosynthétiques

### I.1. Nature et propriété des pigments photosynthétiques

- Propriétés fonctionnelles des pigments photosynthétiques : **hydrophobicité** et  **doubles liaisons**

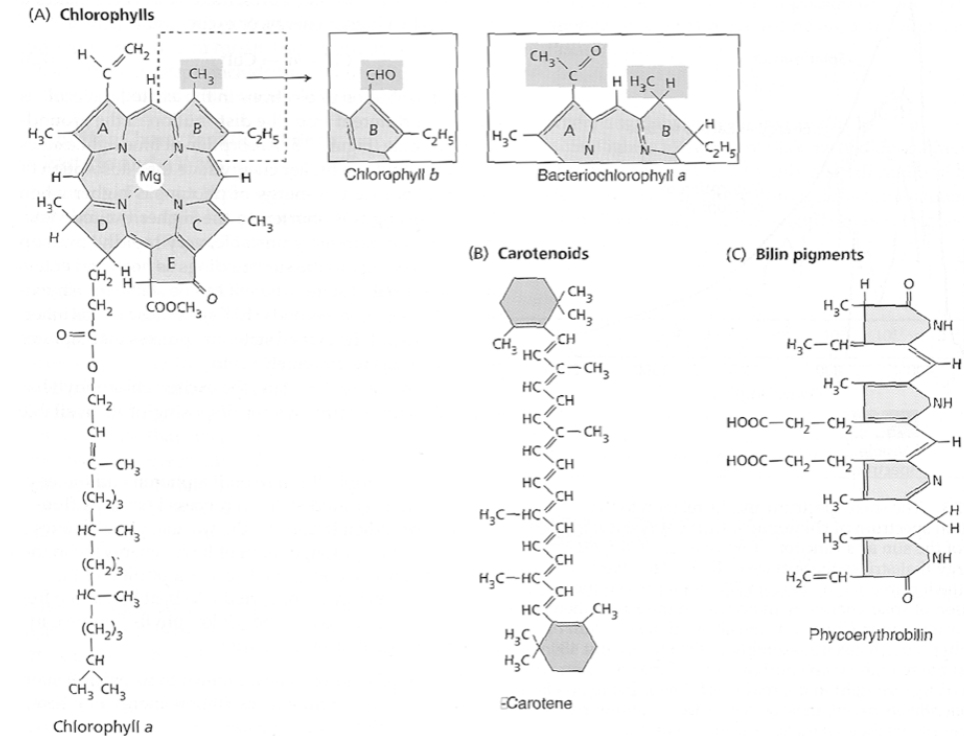
Les chlorophylles (a et b) sont constituées de :

- un **noyau tétrapyrrolique** avec atome de magnésium Mg (à la surface de la membrane du thylakoïde comme un panneau solaire) : **doubles liaisons** dans le noyau → **capture des photons** (doubles liaisons conjuguées = électrons  $\pi$  délocalisés si excités par la lumière)
- une **chaîne carbonée** hydrophobe appelée phytol (chaîne aliphatique) → **enchâssement** dans la membrane du thylakoïde
- ✓ Rq : Dans la chlorophylle b, un  $CH_3$  du noyau tétrapyrrolique est remplacé par un aldéhyde CHO → chloro b est moins hydrophobe que chloro a, donc migre moins loin dans la chromatographie.

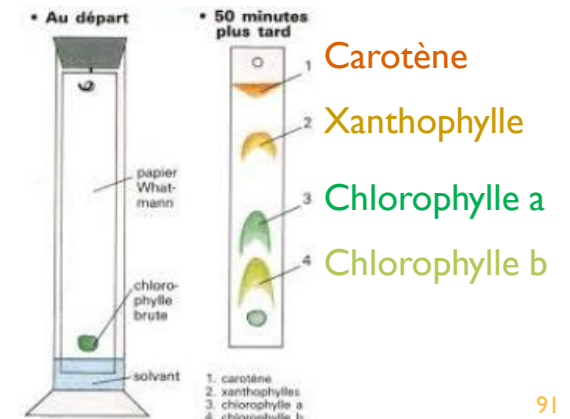
Le  $\beta$ -carotène et les xanthophylles = **caroténoïdes** => hydrophobes. (Rappel : caroténoïdes + stéroïdes = lipides dérivés de l'**isoprène**)

Propriétés fonctionnelles des chlorophylles et caroténoïdes :

- Nombreuses **doubles liaisons conjuguées** → les électrons  $\pi$  délocalisés sont excités par la lumière → capture de photons = pigments.
- Hydrophobes** → pigments membranaires enchâssés dans la membrane des thylakoïdes des chloroplastes.



Structure des pigments (in Taiz et Zeiger)



## C. LA CHAÎNE PHOTOSYNTHÉTIQUE CONVERTIT L'ÉNERGIE LUMINEUSE EN ÉNERGIE CHIMIQUE (POUVOIR REDUCTEUR)

### I. Les membranes des thylakoïdes possèdent des pigments photosynthétiques

#### I.1. Nature et propriété des pigments photosynthétiques

##### ■ Effets des photons sur les pigments :

- Lorsqu'une molécule de pigment absorbe **l'énergie d'un photon**, l'un de ses électrons (**orbitale** du plus haut niveau énergétique occupée par des électrons) passe à une orbitale d'énergie supérieure **état fondamental** → **état excité**

- 3 façons de revenir à l'état fondamental :

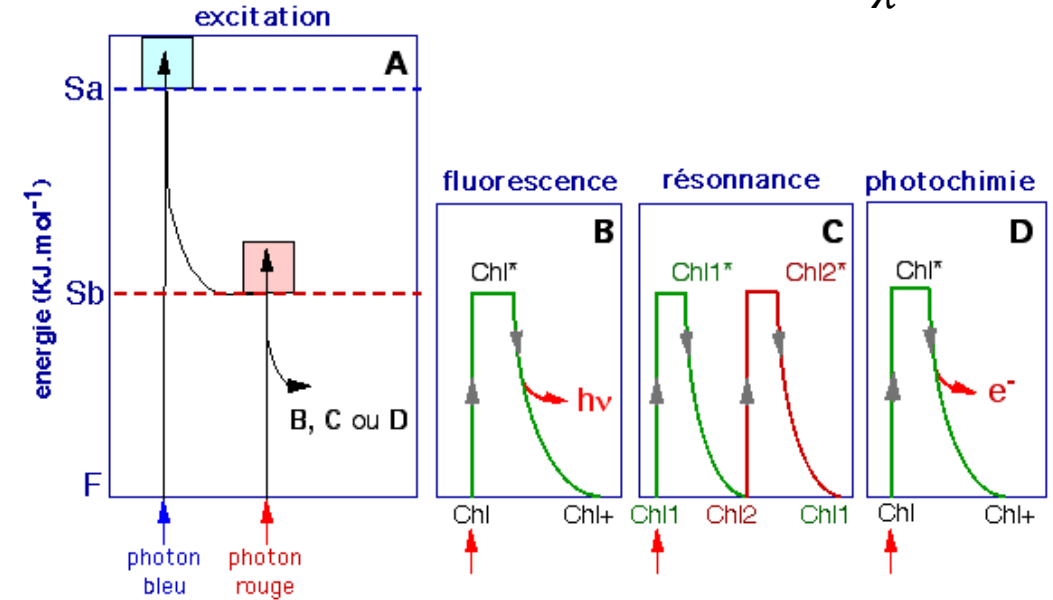
1. **par fluorescence** = en émettant un photon d'énergie inférieure :  $E_2 < E_1$  donc  $\lambda_2 > \lambda_1$  : cas d'un pigment isolé = in vitro.

In vitro, la chlorophylle éclairée émet une fluorescence rouge, lors du retour d'un électron à l'état fondamental.

2. **par résonance** = en émettant un photon d'énergie inférieure qui excite une molécule de pigment voisine. Transmission de l'état d'excitation par résonance, avec perte d'énergie.
3. **par photochimie** = la perte d'un électron par oxydation entraîne le retour à l'état fondamental (uniquement pour chlorophylle a)

Dans les 3 cas, il y a aussi émission de **chaleur** (infrarouges = faible énergie).

$$E = h \cdot \nu = h \cdot \frac{c}{\lambda}$$



*Schéma simplifié de l'excitation (états Sa et Sb) et du retour à l'état fondamental (F) d'une molécule de chlorophylle par fluorescence, résonance ou photochimie.*

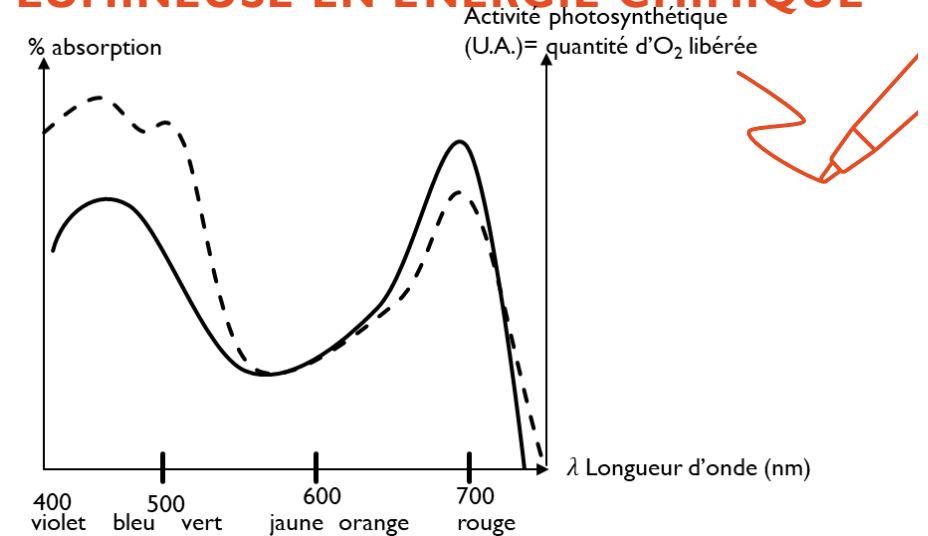
[https://rnbio.upmc.fr/physio\\_veg\\_photosynthese\\_04\\_pigments\\_6](https://rnbio.upmc.fr/physio_veg_photosynthese_04_pigments_6)

## C. LA CHAÎNE PHOTOSYNTHÉTIQUE CONVERTIT L'ÉNERGIE LUMINEUSE EN ÉNERGIE CHIMIQUE (POUVOIR REDUCTEUR)

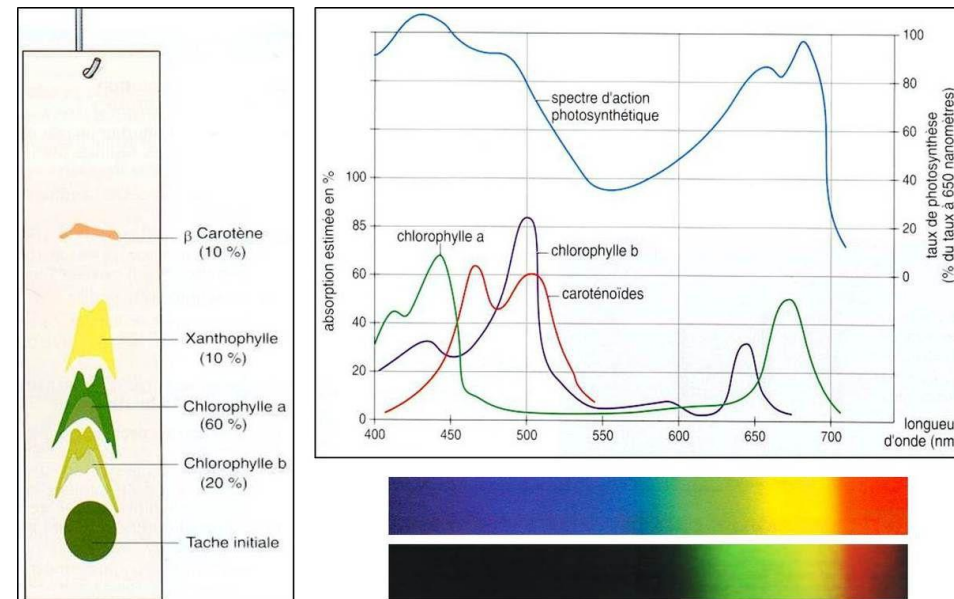
### I. Les membranes des thylakoïdes possèdent des pigments photosynthétiques

#### I.2. Spectre d'action de la lumière et spectre d'absorption des pigments

- Superposition du spectre d'action et du spectre d'absorption
  - L'ensemble des photons absorbés aux  $\lambda$  bleu et rouge sont utilisés pour la photosynthèse
  - Large gamme autour du bleu, plus fine autour du rouge
  - Étude des spectres d'absorption des pigments
- Chlorophylles a et b: absorption dans le bleu et le orange-rouge
- Caroténoïdes: absorption dans le bleu



Spectre d'action de la lumière blanche sur la photosynthèse/spectre d'absorption



Spectre d'absorption de différents pigments

## C. LA CHAÎNE PHOTOSYNTHÉTIQUE CONVERTIT L'ÉNERGIE LUMINEUSE EN ÉNERGIE CHIMIQUE (POUVOIR REDUCTEUR)

### I. Les membranes des thylakoïdes possèdent des pigments photosynthétiques

#### I.3. Les pigments sont organisés en photosystèmes

- Photosystème = complexe multiprotéique :
  - Une **antenne collectrice** appelée LHC (*Light Harvesting Complex*): pigments proches de  $\lambda$  croissante (énergie photonique décroissante) → transfert d'énergie par résonance vers le centre réactionnel
  - Un **centre réactionnel** = un couple de Chl a piège (centre réactionnel P700 pour PSI et P680 pour PSII) = **lieu où l'énergie est transformée en système redox**

1. **Capture d'un photon** par des pigments
2. Transmission de l'excitation de pigment en pigment par **résonance**
3. **Changement de potentiel redox de la chl a red** qui devient chl a\*red du cœur réactionnel
4. → perte de  $2e^-$  (→ **plastoquinone**) et retour à l'état fondamental = oxydant fort Chl a
5. **Réduction de la chlorophylle a par l'eau** (chl a ox → chl a red)

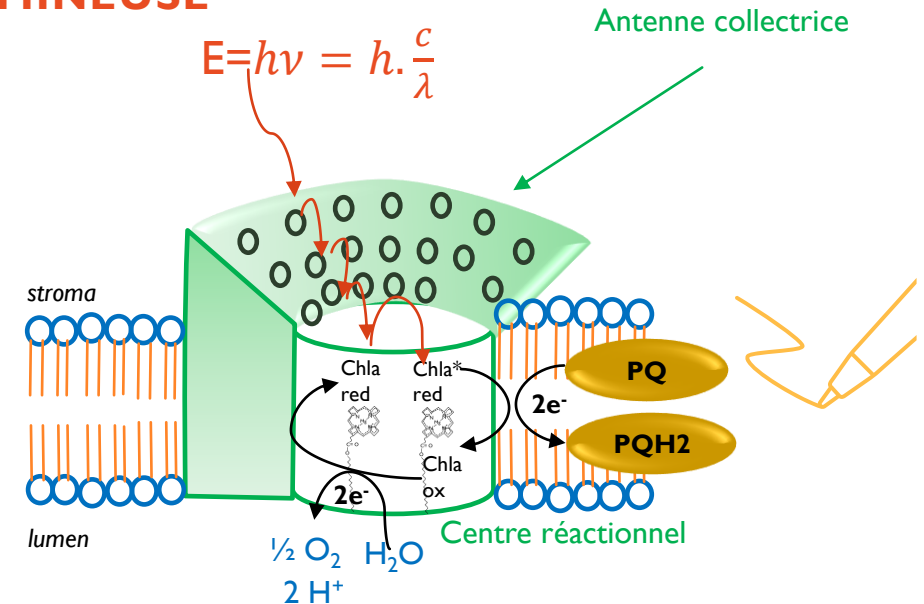
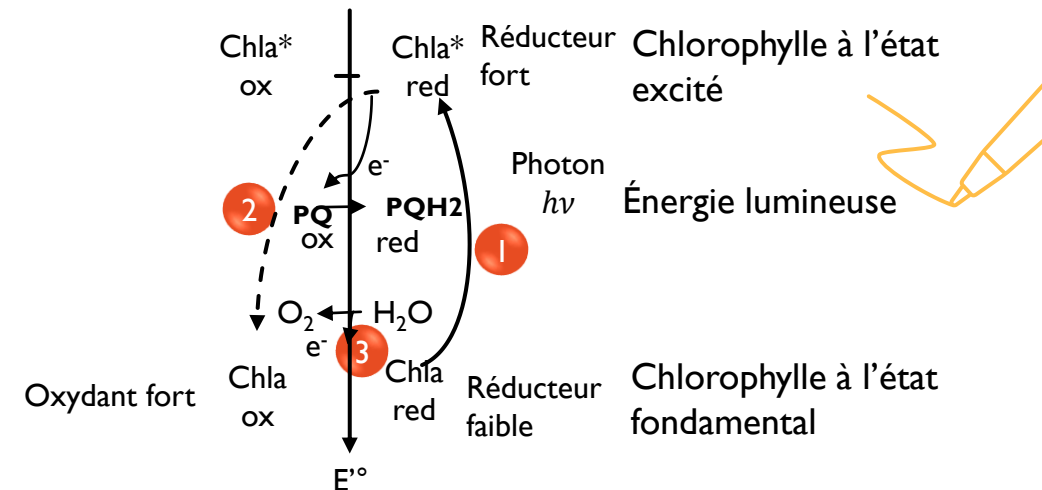


Figure 30: fonctionnement d'un photosystème



Les différents états d'excitation de la chlorophylle a du centre réactionnel

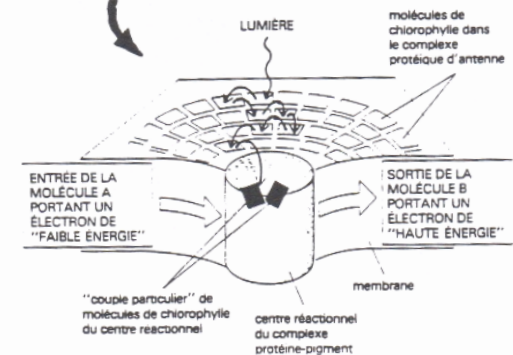
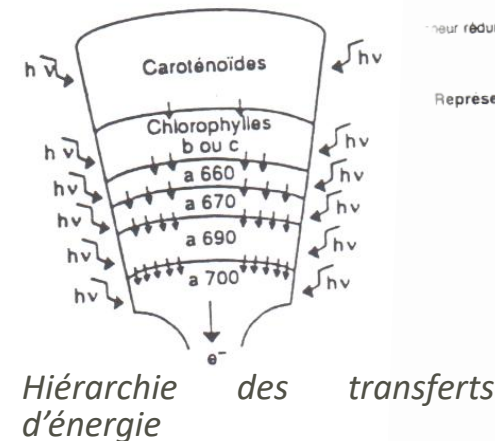
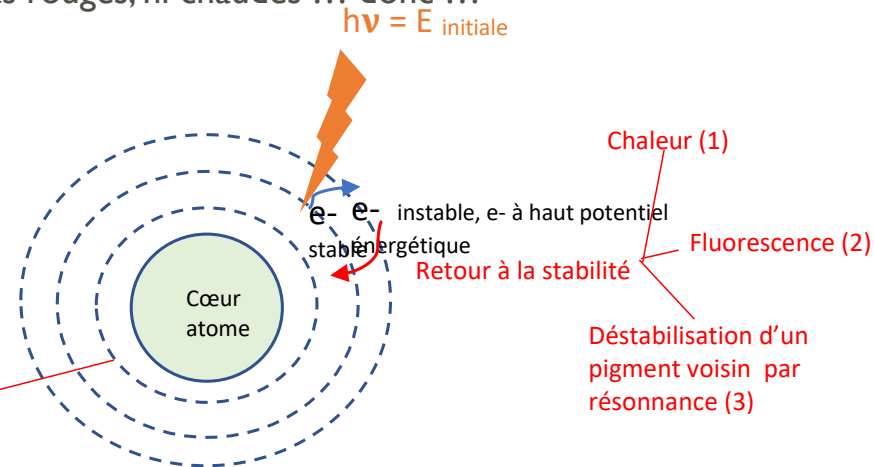
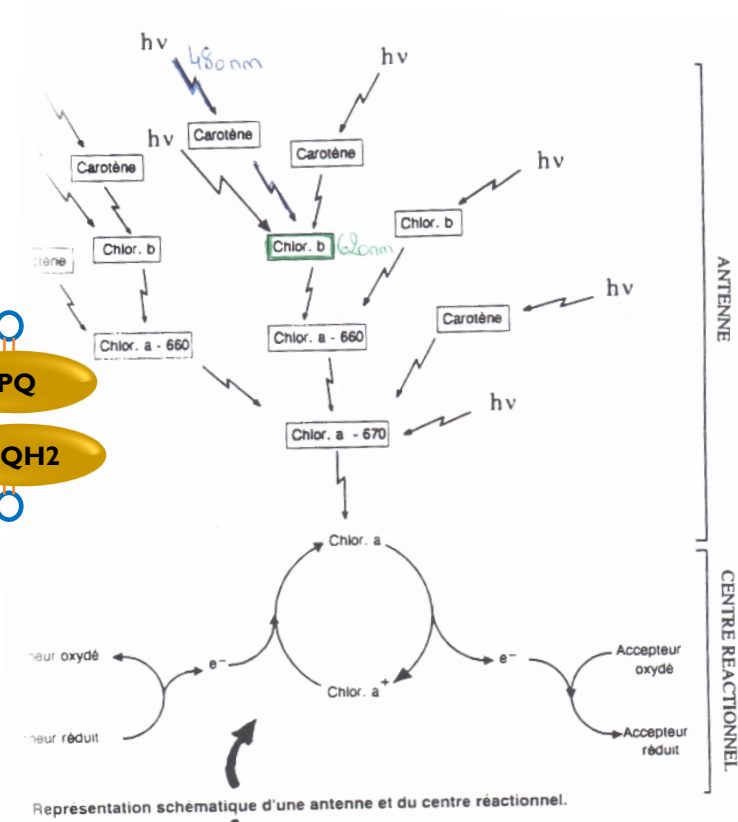
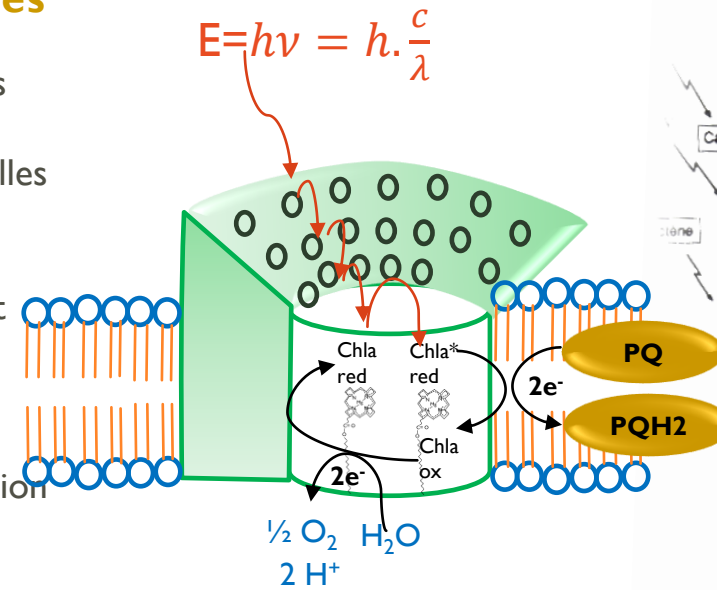
# C. LA CHAÎNE PHOTOSYNTHÉTIQUE CONVERTIT L'ÉNERGIE LUMINEUSE EN ÉNERGIE CHIMIQUE

## I. Les membranes des thylakoïdes possèdent des pigments photosynthétiques

### I.3. Les pigments sont organisés en photosystèmes

- Rappel sur l'effet des photons sur les pigments:
  - Dans une antenne collectrice, nombreux pigments insérés dans les polypeptides
  - Le centre réactionnel accueille seulement un couple de chlorophylles a « pièges »
  - Excitation d'un pigment => délocalisation d'e- à partir d'orbitales internes vers orbitales externes. Plus e- proche du cœur, plus c'est stable
- retour à l'état fondamental
  - => (1) chaleur
  - => (2) fluorescence (cf solution de chlorophylle éclairée → émission de radiation rouge)
  - => (3) résonance
  - => récupération d'un e- de bas potentiel énergétique

Or: les plantes ne sont pas rouges, ni chaudes ... donc ...



Conséquences possibles de l'excitation d'un pigment par l'énergie lumineuse

## C. LA CHAÎNE PHOTOSYNTHÉTIQUE CONVERTIT L'ÉNERGIE LUMINEUSE EN ÉNERGIE CHIMIQUE (POUVOIR REDUCTEUR)

### 2. Des transferts d'électrons endergoniques entre un donneur et un accepteur

- Test d'hypothèse: on cherche à mettre en évidence la nécessité d'un pouvoir réducteur dans la phase photochimique
  - Protocole:
    - Suspension de chloroplastes et de mitochondries dans un milieu tamponné sans  $\text{CO}_2$
    - Suivi de  $[\text{O}_2]_{\text{dissous}}$  au cours du temps à l'obscurité et à la lumière avant et après ajout de  $\text{Fe}^{3+}$  (puissant oxydant)
  - Résultats:
    - Production d'  $\text{O}_2$  ssi présence de  $\text{Fe}^{3+}$  à la lumière  
=> L'oxydation de l'eau nécessite au préalable le transfert d'un électron de la chlorophylle à un accepteur primaire d'électron
    - production d' $\text{O}_2$  s'interrompt à l'obscurité
- => La lumière est nécessaire à l'excitation de la chlorophylle a, qui devient un oxydant fort (après oxydation par PQ) et permet la photooxydation de l'eau lors de son retour à l'état fondamental.
- L'accepteur naturel d'électrons est le  $\text{NADP}^+$ , réduit en  $\text{NADPH}$ ,  $\text{H}^+$ . La réaction d'oxydation de l'eau libère des électrons récupérés par cet intermédiaire, elle a lieu en présence de lumière, elle est indépendante de la réaction de réduction du  $\text{CO}_2$

#### Expérience de Hill

Enregistrer la concentration d' $\text{O}_2$  dans une suspension de chloroplastes isolés dans un tampon sans  $\text{CO}_2$  lors d'une séquence: obscurité-lumière-obscurité avec injection d'ions  $\text{Fe}^{3+}$  à la lumière

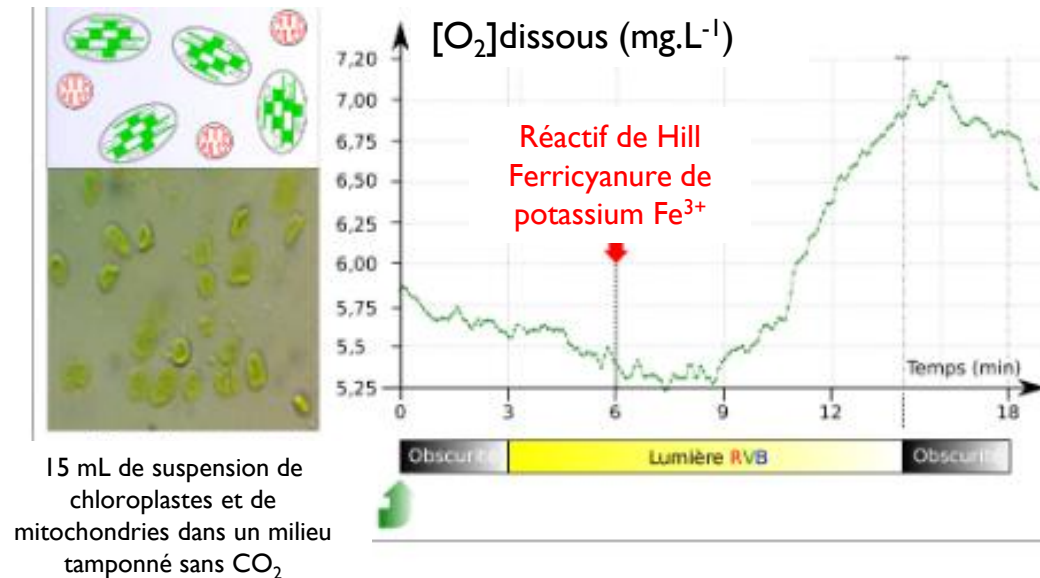
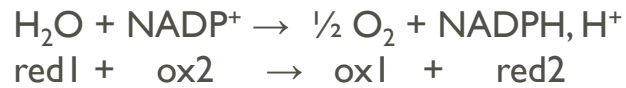


Figure 32: Expérience de Hill

## C. LA CHAÎNE PHOTOSYNTHÉTIQUE CONVERTIT L'ÉNERGIE LUMINEUSE EN ÉNERGIE CHIMIQUE (POUVOIR REDUCTEUR)

### 2. Des transferts d'électrons endergoniques entre un donneur et un accepteur

- On peut établir la réaction rédox globale suivante :



Connaissant les valeurs de potentiel rédox standard :  $E^\circ \text{O}_2/\text{H}_2\text{O} = +0,81\text{V}$  et  $E^\circ \text{NADP}^+/\text{NADPH}, \text{H}^+ = -0,32\text{V}$ , on peut calculer la variation de potentiel rédox standard :  $\Delta E^\circ = E^\circ \text{NADP}^+/\text{NADPH}, \text{H}^+ - E^\circ \text{O}_2/\text{H}_2\text{O} = -0,32 - (+0,81) = -1,13\text{V}$

On peut calculer maintenant la variation d'enthalpie libre standard :

$$\Delta rG^\circ = -n.F.(E_{acc} - E_{donn})$$

- Le transfert d'électrons est exergonique si les électrons vont dans le sens des **potentiels redox croissants**.
- $\Delta rG^\circ = -n.F.F\Delta E^\circ = -2.96,5.(-1,13) = +218 \text{ kJ.mol}^{-1}$  pour le transfert d'une paire d'électrons.
- L'enthalpie libre standard est positive, le transport des électrons de  $\text{H}_2\text{O}$  au  $\text{NADP}^+$  ne peut se faire dans le sens des potentiels décroissants. Cette réaction redox est **endergonique** et thermodynamiquement non favorable (spontanée). Elle a pourtant lieu grâce à l'énergie apportée par la lumière.

Couple redox	$E^\circ$ (V)
$\text{O}_2 / \text{H}_2\text{O}$	+ 0,82
$\text{P}_{680}^+ / \text{P}_{680}$	+ 0,9
$\text{P}_{680}^{++} / \text{P}_{680}^{+}$	-0,8
Plastoquinone (ox/red)	0
Complexe b6-f (ox/red)	+ 0,2
$\text{P}_{700}^+ / \text{P}_{700}$	+ 0,4
$\text{P}_{700}^{++} / \text{P}_{700}^{+}$	-1,3
Ferredoxine (ox/red)	-0,42
$\text{NADP}^+ / \text{NADPH}, \text{H}^+$	-0,32

Potentiels redox standard apparents des couples oxydant-réducteur de la chaîne photosynthétique

## C. LA CHAÎNE PHOTOSYNTHÉTIQUE CONVERTIT L'ÉNERGIE LUMINEUSE EN ÉNERGIE CHIMIQUE (POUVOIR REDUCTEUR)

### 3. La chlorophylle a assuré la conversion de l'énergie lumineuse en énergie chimique

- La chlorophylle a = seule molécule **au monde à** pouvoir **changer de potentiel rédox** : son potentiel rédox diminue lorsqu'elle est excitée. La chlorophylle du centre réactionnel est un réducteur faible, qui devient un réducteur fort lorsqu'elle est excitée par un photon.
- Il y a **couplage photochimique** : conversion de l'énergie lumineuse en énergie chimique = pouvoir réducteur de la chlorophylle excitée.
- La **lumière a permis la formation d'un réducteur fort**, la chlorophylle excitée, qui va pouvoir réduire un accepteur primaire d'électron à bas potentiel rédox : **plastoquinone**
- La chlorophylle a du centre réactionnel excitée, réducteur fort, retourne à l'état fondamental en cédant un électron à un accepteur primaire (photochimie): PQ.
- Elle devient alors un oxydant fort (plus fort que l'oxygène).
- Le marquage de l'eau par l'oxygène 18 ( $H_2^{18}O$ ) montre que le donneur primaire d'électrons dans la photosynthèse est l'eau (car le végétal rejette du dioxygène marqué).
- La chlorophylle oxydée est réduite par l'eau : c'est la photooxydation de l'eau.
- L'eau est le donneur d'électron qui réduit la chlorophylle

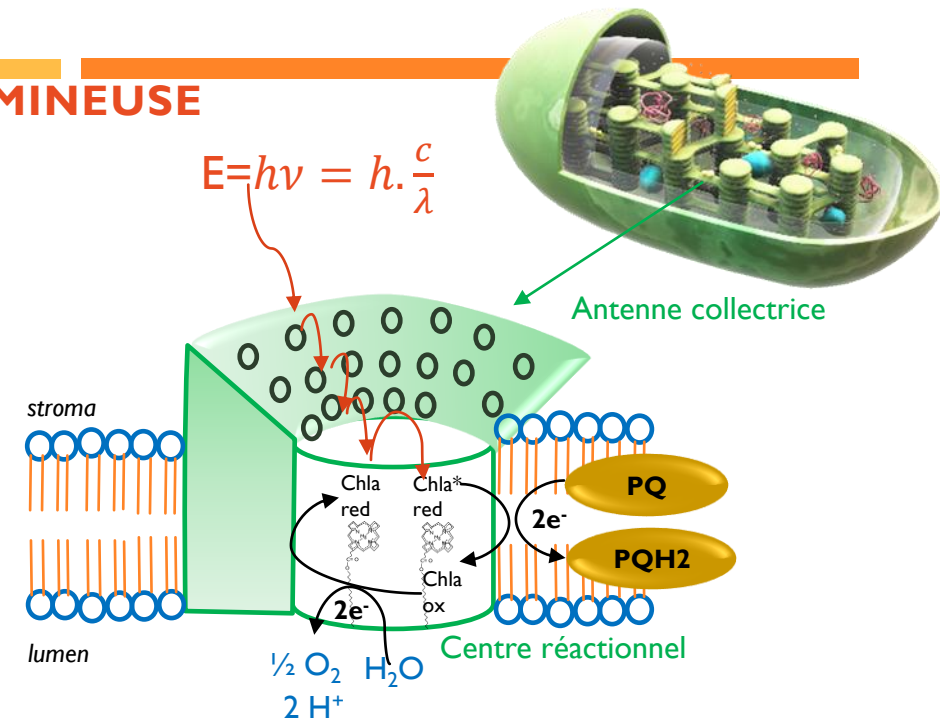
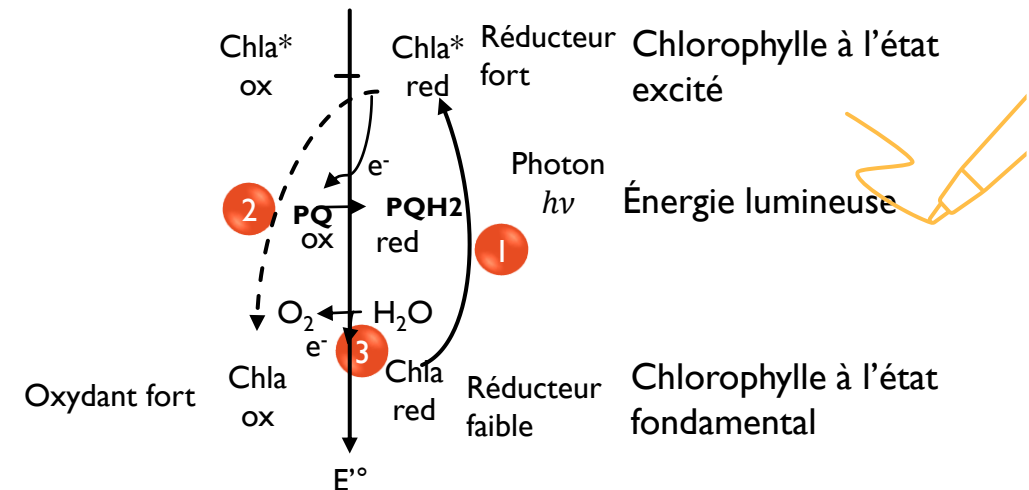


Figure 30: fonctionnement d'un photosystème



Les différents états d'excitation de la chlorophylle a du centre réactionnel

## C. LA CHAÎNE PHOTOSYNTHÉTIQUE CONVERTIT L'ÉNERGIE LUMINEUSE EN ÉNERGIE CHIMIQUE (POUVOIR REDUCTEUR)

### 4. La chaîne photosynthétique en Z assure un couplage chimio-osmotique

#### 4.1. Organisation de la chaîne photosynthétique

- La chaîne photosynthétique comprend 2 PS :
  - le photosystème II absorbe les longueurs d'ondes  $\lambda < 680$  nm. Son **centre réactionnel** est la chlorophylle a P680. Il produit du dioxygène  $O_2$ .
  - le photosystème I absorbe des  $\lambda > 680$  nm. Il ne dégage pas de  $O_2$ . Son centre réactionnel est la chlorophylle a P700.

Figure 33: Potentiels redox standard apparents des couples oxydant-réducteur de la chaîne photosynthétique

Couple redox	$E'^{\circ}$ (V)
$O_2 / H_2O$	+ 0,82
$P_{680}^+ / P_{680}$	+ 0,9
$P_{680}^{+*} / P_{680}^*$	-0,8
Plastoquinone (ox/red)	0
Complexe b6-f (ox/red)	+ 0,2
$P_{700}^+ / P_{700}$	+ 0,4
$P_{700}^{+*} / P_{700}^*$	-1,3
Ferredoxine (ox/red)	-0,42
$NADP^+ / NADPH, H^+$	-0,32

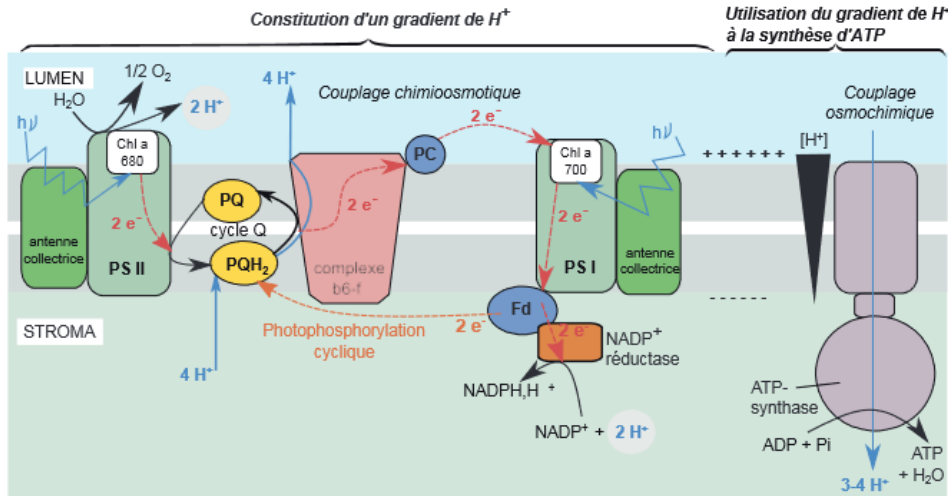
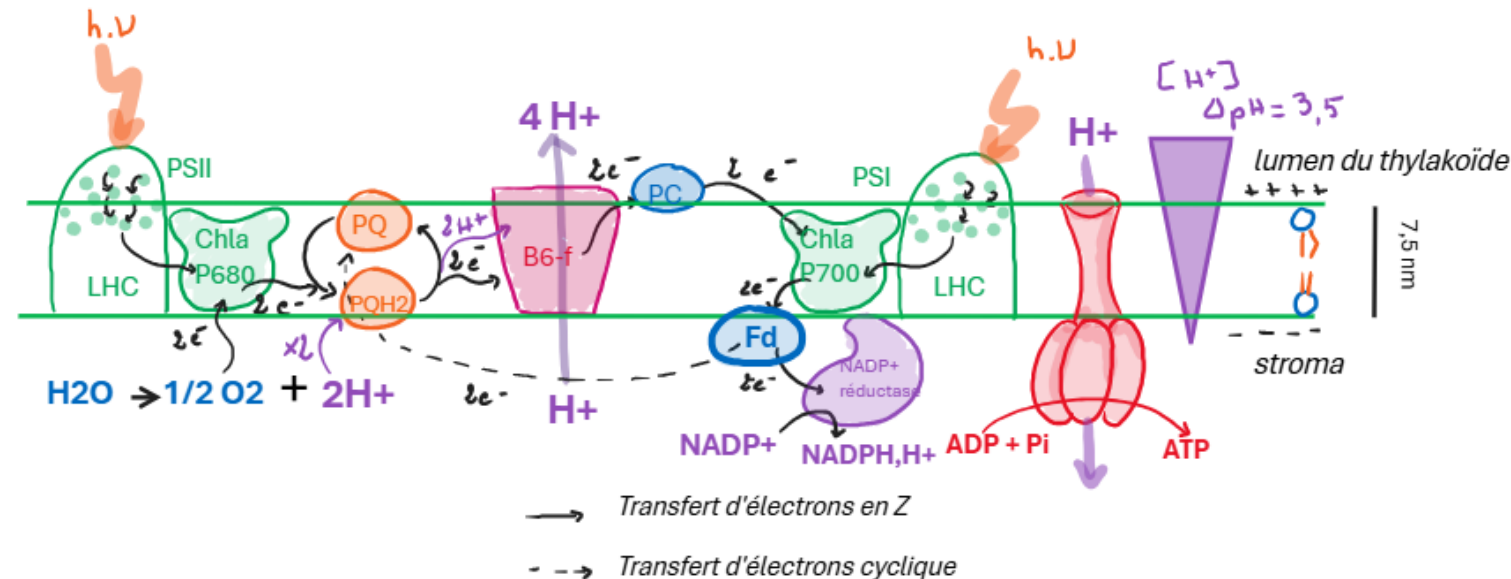


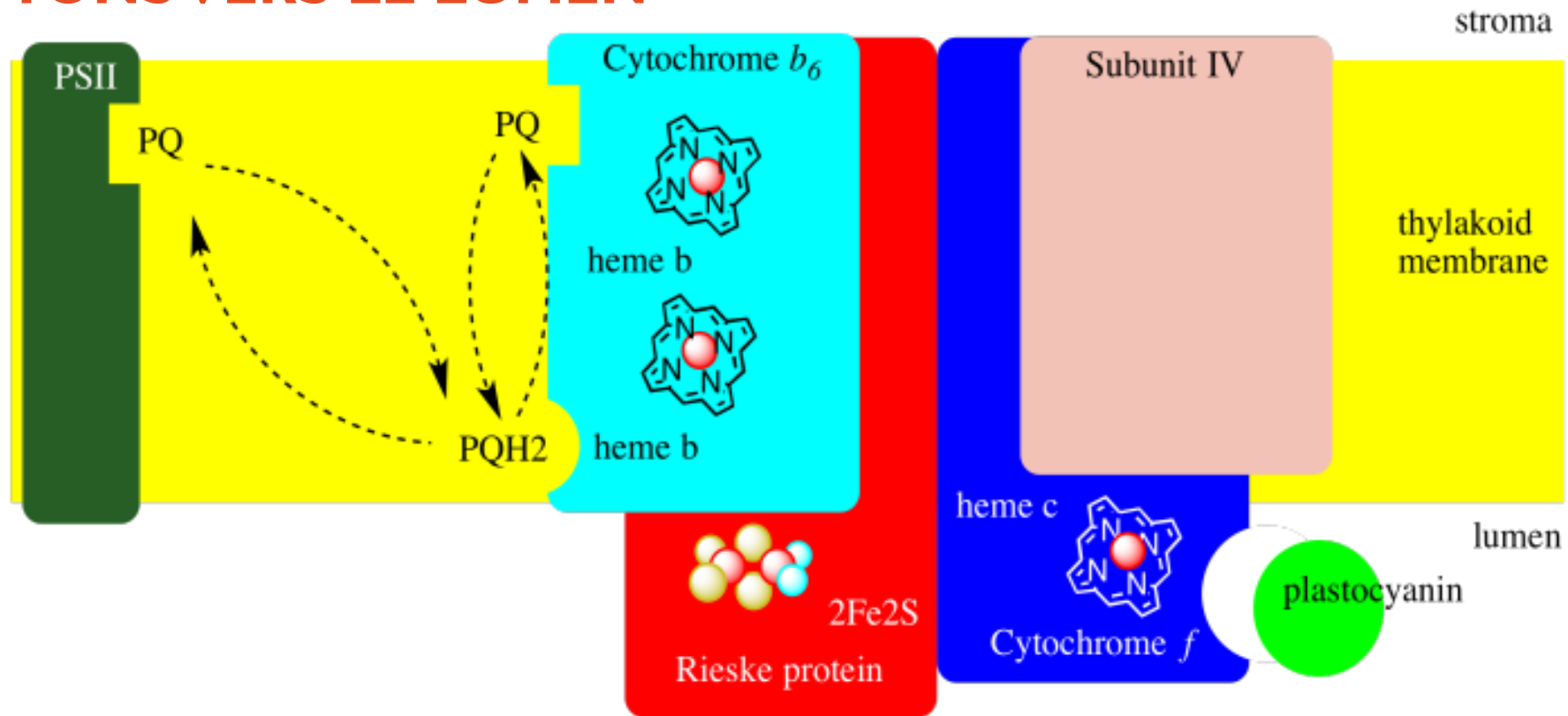
Figure 10.6 Photophosphorylation au niveau de la membrane des thylakoïdes. PQ : plastoquinone ; PC : plastocyanine ; Fd : ferredoxine ; PS : photosystème. Les protons réactionnels sont sur fond gris. On note  $h\nu$  l'énergie lumineuse, ce qui correspond à l'énergie portée par un photon (relation de Planck).

(source Dunod)



Modèle de la chaîne photosynthétique (S. Dalaine)

# L'OXYDATION DE PQH<sub>2</sub> PAR LE CYTOCHROME b<sub>6</sub>f INDUIT LE TRANSFERT DE 4 PROTONS VERS LE LUMEN



*Simplified picture of some main features of cytochrome b<sub>6</sub>f*

[https://chem.libretexts.org/Bookshelves/General\\_Chemistry/Book%3A\\_Structure\\_and\\_Reactivity\\_in\\_Organic\\_Biological\\_and\\_Inorganic\\_Chemistry\\_\(Schaller\)/V%3A\\_\\_Reactivity\\_in\\_Organic\\_Biological\\_and\\_Inorganic\\_Chemistry\\_3/09%3A\\_Photosynthesis/9.06%3A\\_Adding\\_a\\_Proton\\_Pump-\\_Cytochrome\\_b6f\\_Complex](https://chem.libretexts.org/Bookshelves/General_Chemistry/Book%3A_Structure_and_Reactivity_in_Organic_Biological_and_Inorganic_Chemistry_(Schaller)/V%3A__Reactivity_in_Organic_Biological_and_Inorganic_Chemistry_3/09%3A_Photosynthesis/9.06%3A_Adding_a_Proton_Pump-_Cytochrome_b6f_Complex)



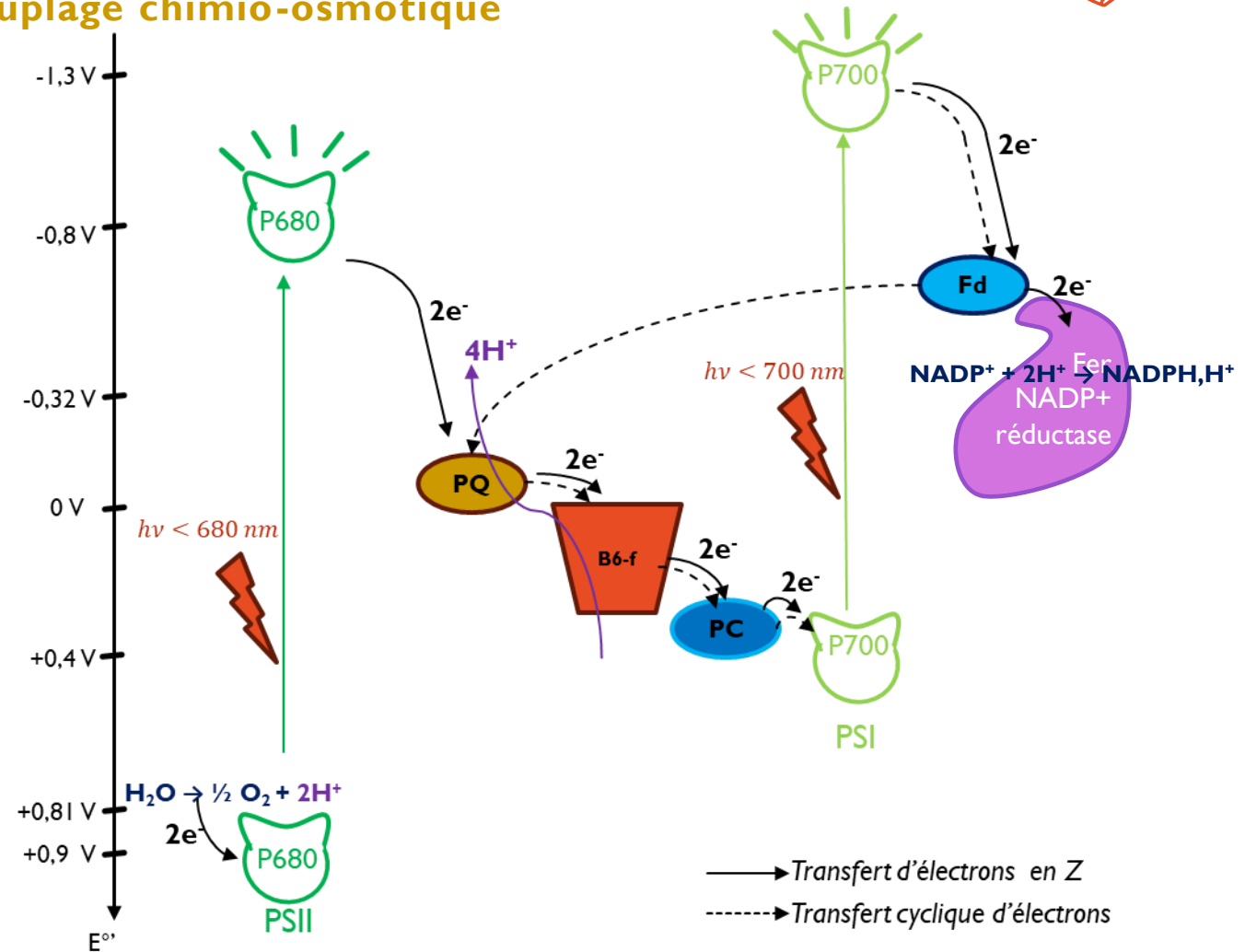
## C. LA CHAÎNE PHOTOSYNTHÉTIQUE CONVERTIT L'ÉNERGIE LUMINEUSE EN ÉNERGIE CHIMIQUE (POUVOIR REDUCTEUR)

### 4. La chaîne photosynthétique en Z assure un couplage chimio-osmotique

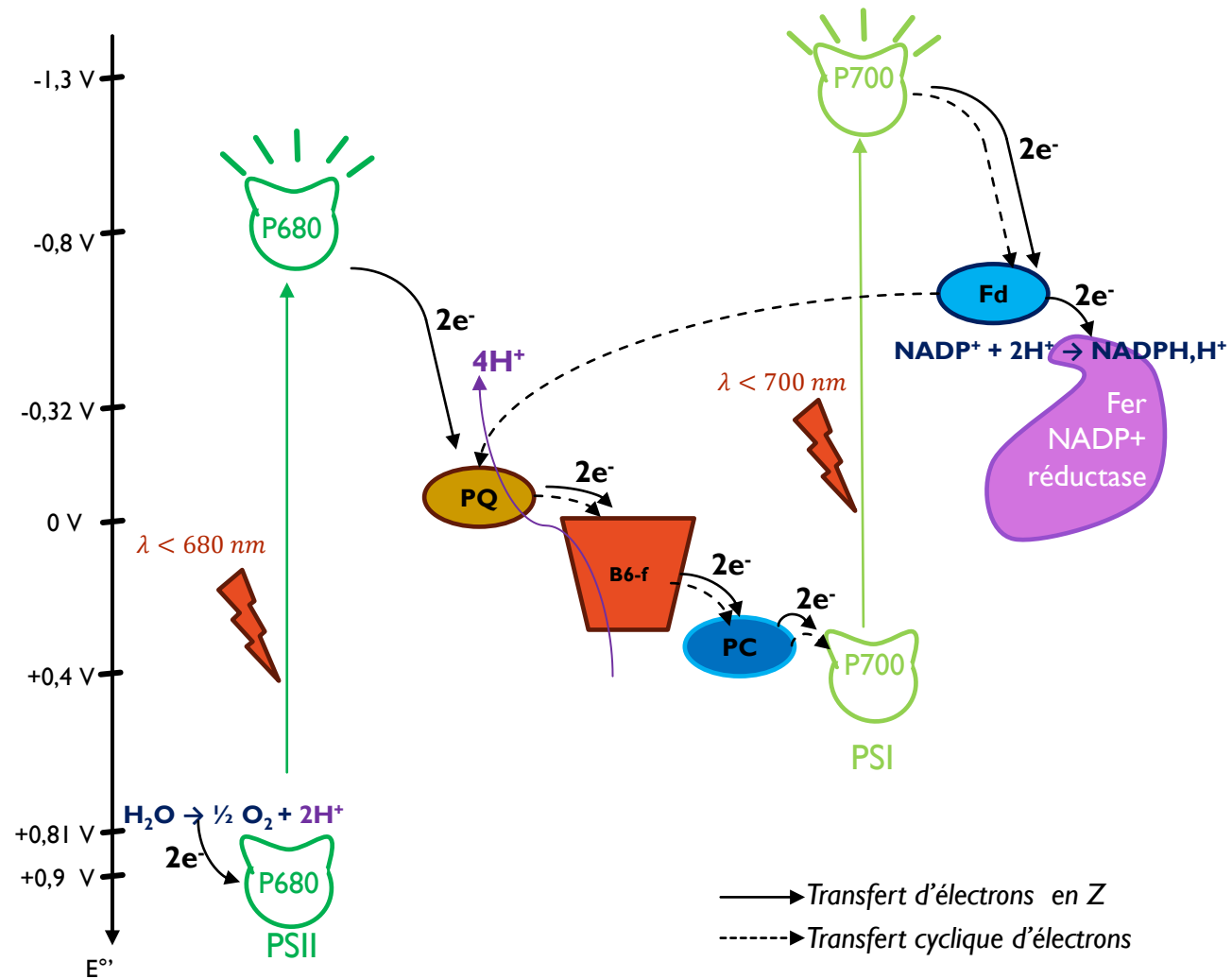
#### 4.1. Organisation de la chaîne photosynthétique

##### 2 couplages et transferts d'électrons

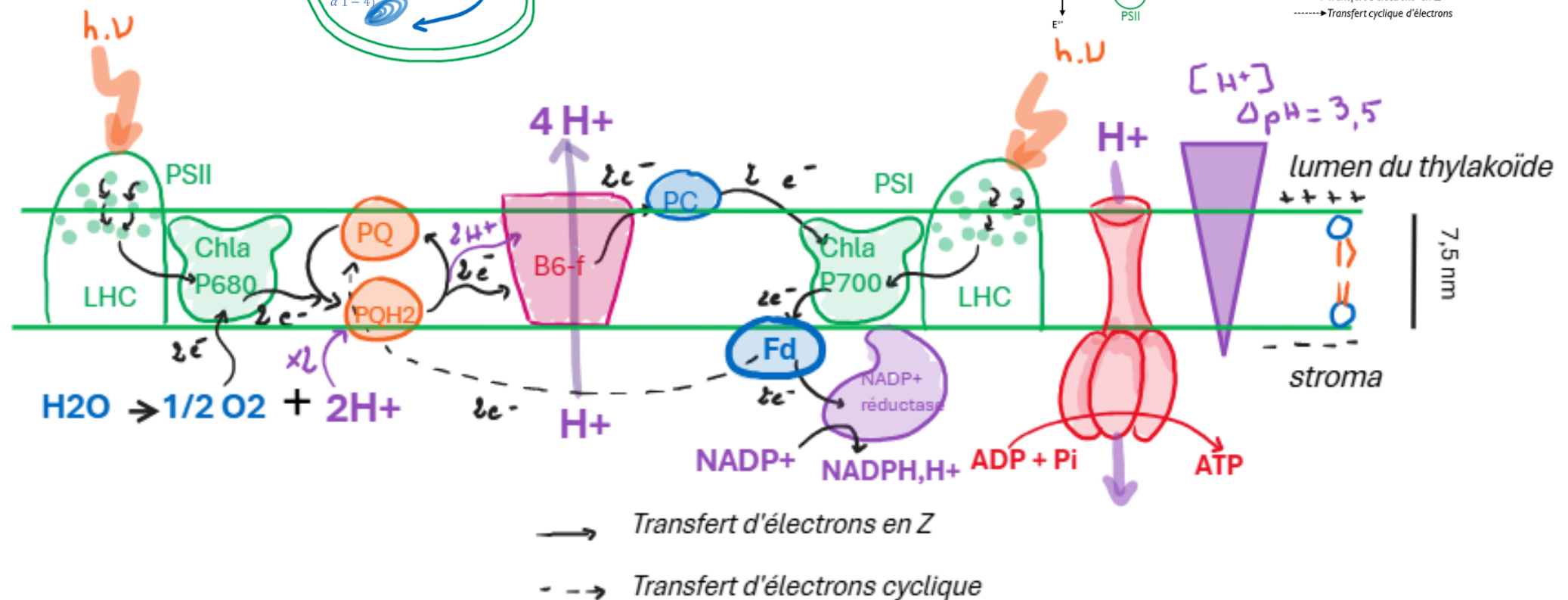
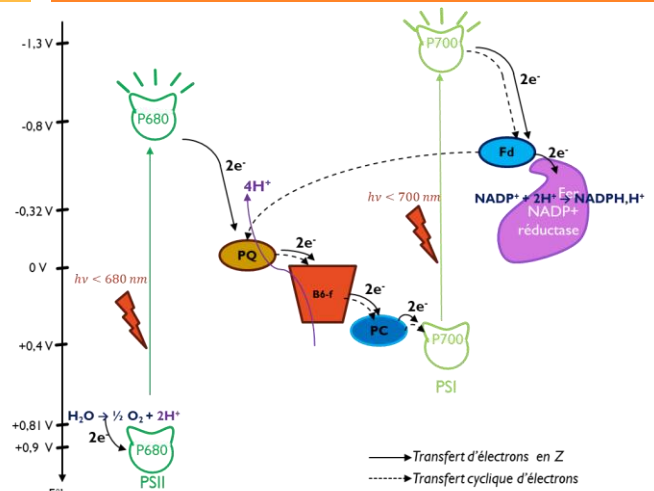
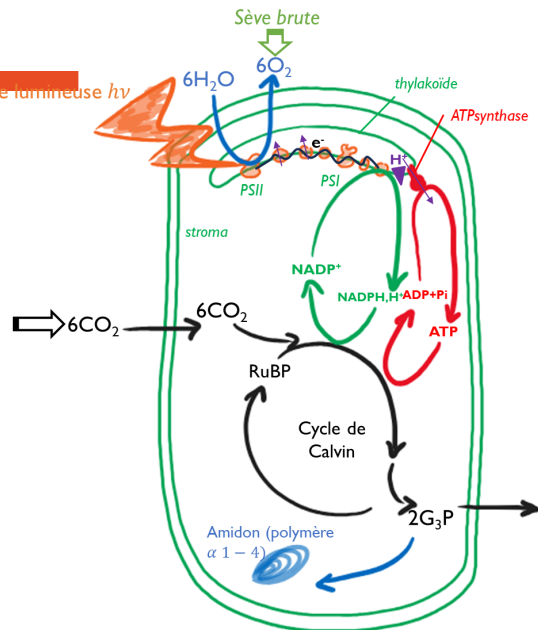
- Couplage photochimique** : au niveau de chacun des deux photosystèmes, l'énergie lumineuse permet le changement de potentiel rédox de la chlorophylle : elle devient **très réductrice** = formation de pouvoir réducteur, ce qui lui permet de céder des électrons = photochimie
  - la chlorophylle du photosystème II retourne à l'état fondamental par perte d'un électron → elle devient un oxydant fort capable d'oxyder l'eau.
  - la chlorophylle I donne un électron à la ferredoxine et récupère l'électron de la chlorophylle du PSII = coopération entre les deux PS
- Transferts d'électrons** :
  - transferts endergoniques : de la chlorophylle non excitée à l'accepteur primaire : dans le sens des potentiels rédox décroissants d'où nécessité de lumière
  - transferts exergoniques : le long de la chaîne photosynthétique, entre PSII et PSI



Transferts d'électrons le long de la chaîne photosynthétique = schéma en Z (S. Dalaine)



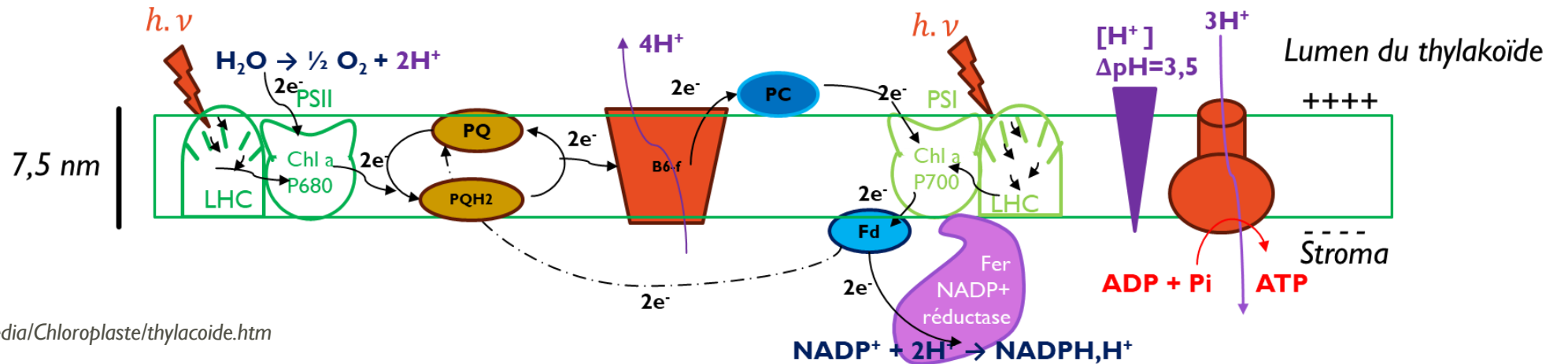
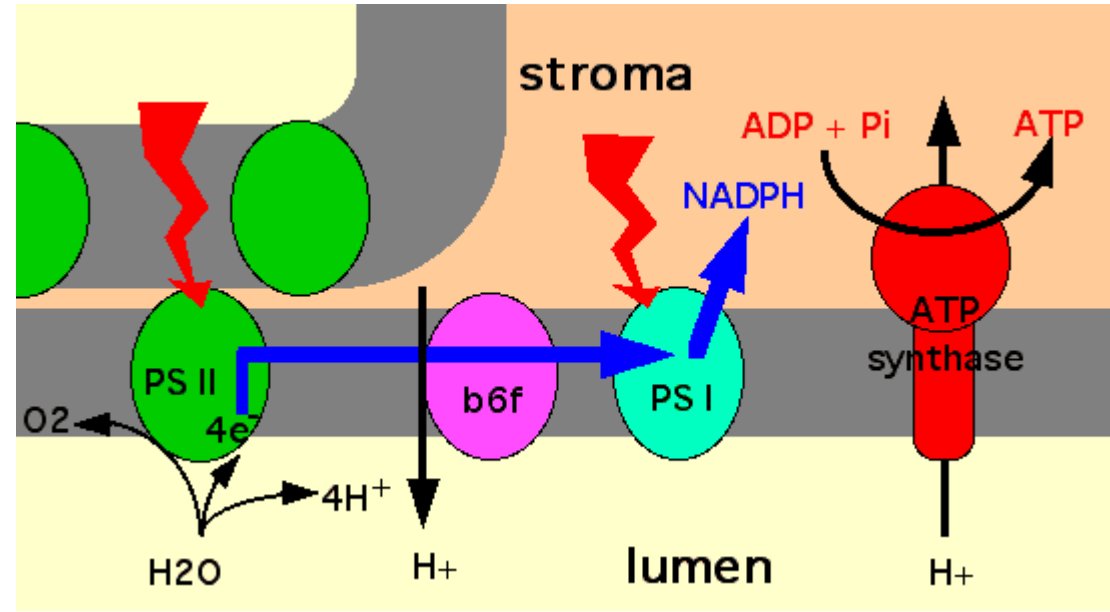
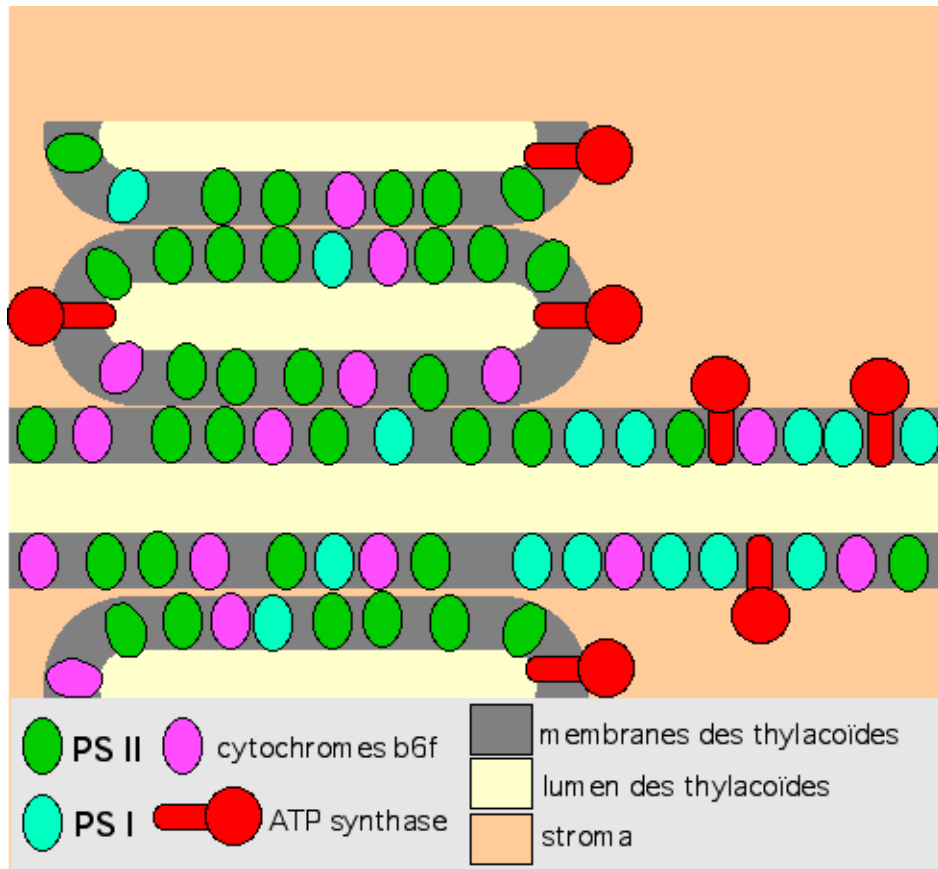




→ Transfert d'électrons en Z

- - -> Transfert d'électrons cyclique

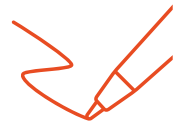
Modèle de la chaîne photosynthétique (S. Dalaine)



<https://www.snv.jussieu.fr/bmedia/Chloroplaste/thylacoïde.htm>

———> Transfert d'électrons en Z  
 - - - - -> Transfert cyclique d'électrons

# C. LA CHAÎNE PHOTOSYNTHÉTIQUE CONVERTIT L'ÉNERGIE LUMINEUSE EN ÉNERGIE CHIMIQUE (POUVOIR REDUCTEUR)



## 4. La chaîne photosynthétique en Z assure un couplage chimio-osmotique

### 4.1. Organisation de la chaîne photosynthétique

#### Cas du transfert cyclique des électrons

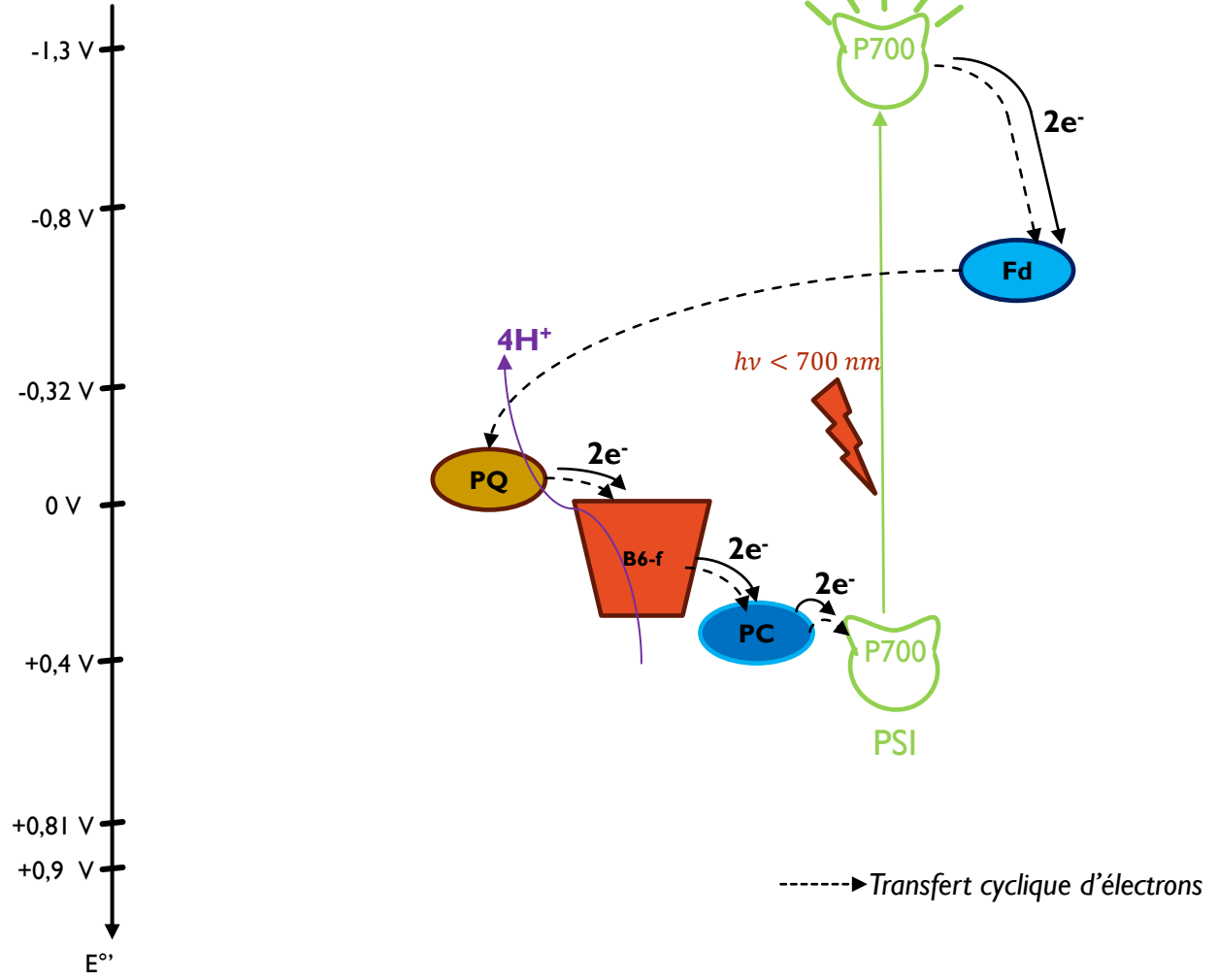
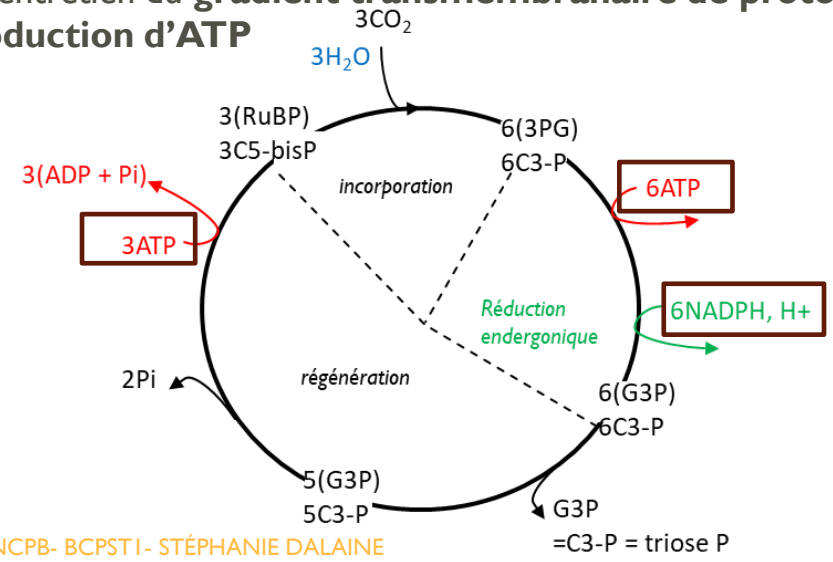


- transfert cyclique d'électrons entre le PSI et la plastoquinone.
- ferrédoxine réduite donne ses électrons → plastoquinone → b6-f → Pc → P700+

=> pas de production de NADPH, H<sup>+</sup>,

=> pas de production de dioxygène

=> entretien du gradient transmembranaire de protons => production d'ATP



Transfert cyclique d'électrons le long de la chaîne photosynthétique (S. Dalaine)

# C. LA CHAÎNE PHOTOSYNTHETIQUE CONVERTIT L'ENERGIE LUMINEUSE EN ENERGIE CHIMIQUE

## 4. La chaîne photosynthétique en Z assure un couplage chimio-osmotique

### 4.2. Conversion de l'énergie lumineuse en énergie de gradient

#### Mise en évidence d'un gradient protonique

- **Protocole:** On mesure la concentration en protons dans une suspension de thylakoïdes extraits des chloroplastes, en absence et en présence de lumière.
- **Résultats:** La concentration en protons à l'extérieur des thylakoïdes diminue à la lumière. Donc la lumière permet une translocation de protons vers le lumen.

=> Il y a conversion de l'énergie lumineuse en énergie de gradient.

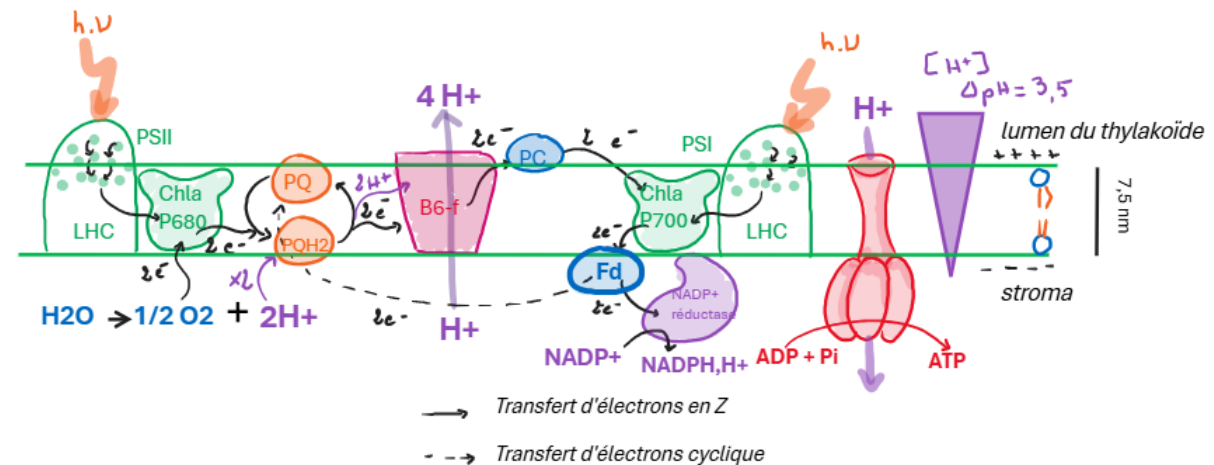
#### ▪ Mécanismes:

- La chlorophylle excitée par un photon → réducteur fort. Le transfert exergonique d'électrons à partir de la chlorophylle excitée couplé au transport endergonique de protons contre leur gradient électrochimique.
- Deux plastoquinones réduites par 4 électrons et 4 protons prélevés dans le stroma.
- $2 PQ + 4 e^- + 4 H^+ \rightarrow 2 PQH_2$
- La plastoquinone transfère les protons au complexe b6-f qui les relâche dans l'espace intrathylakoïde.
- nombre de protons transférés pour 4 électrons ~ 8 (donc 4 pour 2 électrons) → lumen au pH = 5, est ainsi mille fois plus concentré en protons que le stroma à pH = 8. ce pH est le pH optimal pour la RubisCO.

Suspension de thylakoïdes (choc osmotique sur chloroplastes + centrifugation)



Mise en évidence d'un couplage osmo-chimique au niveau du chloroplaste (S. Dalaine)



## SV-E-I-A Les formes d'énergie dans la cellule

### I. Les besoins énergétiques cellulaires et leur couverture par des sources énergétiques diversifiées

- A. L'organisation fonctionnelle de l'état cellulaire est indissociable d'un flux énergétique
- B. Les principes thermodynamiques

### II. Les formes d'énergie dans la cellule

- A. Les énergies de réaction
- B. Les énergies de gradients
- C. Les énergies d'oxydo-réduction
- D. L'énergie mécanique

### III. Les couplages énergétiques

- A. Couplage chimio-osmotiques
- B. Couplage osmo-chimique
- C. Couplage osmo-osmotique
- D. Couplage chimio-chimique
- E. L'énergie de réaction permet de faire tourner un cycle

## SV-E-I-B Approvisionnement et devenir des molécules

### I. L'approvisionnement et le devenir des molécules organiques ou minérales dans les cellules

- A. La MO est nécessaire au métabolisme de la cellule
- B. Les cellules hétérotrophes prélèvent la MO
- C. Les cellules autotrophes réduisent la MN prélevée en MO

## II. La photosynthèse assure la réduction des MN en convertissant l'énergie lumineuse

- A. La photosynthèse : une réduction du C minéral
- B. Le cycle de Calvin
- C. La chaîne photosynthétique
- D. La chimiosynthèse: cas de Nitrobacter

## SV-E-IC Pièce centrale des voies du métabolisme énergétique : l'ATP, un coenzyme nucléotidique de transfert de phosphoryle

### I. L'énergie d'hydrolyse d'un coenzyme nucléotidique, l'ATP

- A. Les liaisons phosphoanhydrides
- B.  $\Delta rG^{\circ}$  et  $\Delta rG'$  d'hydrolyse de l'ATP
- C. La position intermédiaire du potentiel d'hydrolyse de l'ATP

### II. De nombreuses transformations cellulaires exploitent des transferts de phosphoryle : utilisation majeure de l'ATP

- A. Des réactions de transfert de phosphoryle
- B. Le bilan sur les transferts de phosphoryle

### III. Les couplages permettant la synthèse d'ATP

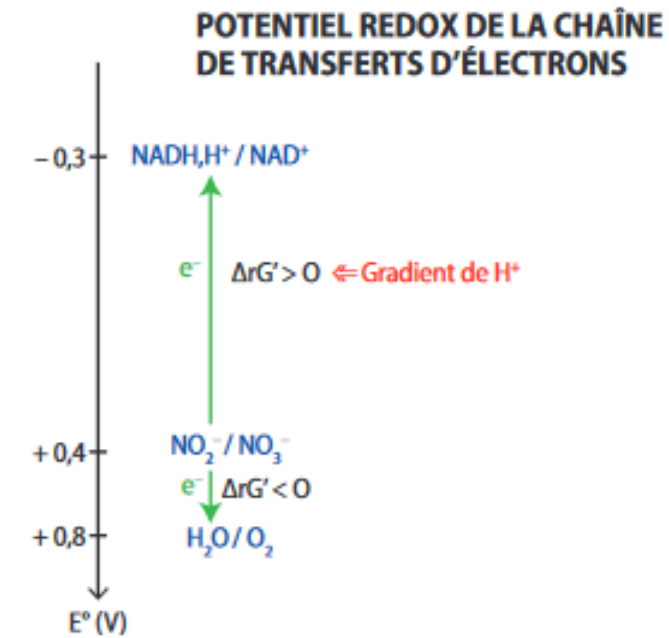
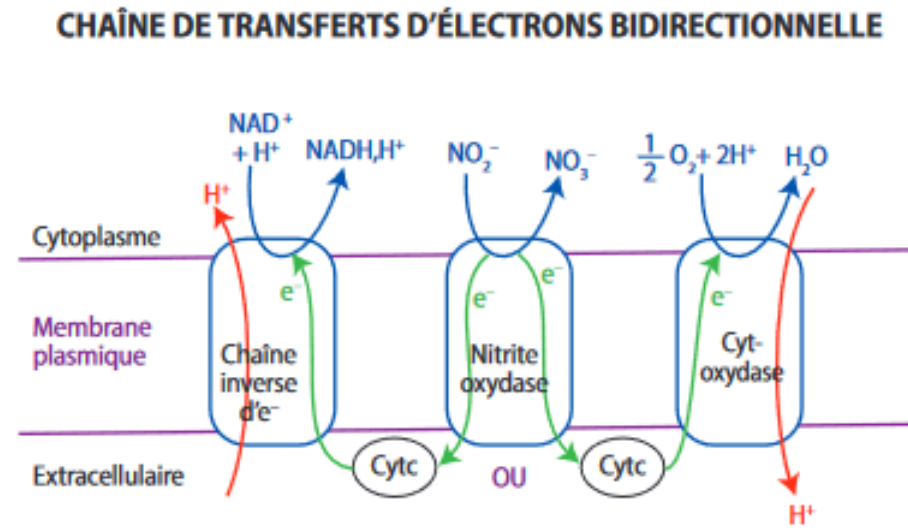
- A. La formation d'ATP par transphosphorylation
- B. La formation d'ATP par conversion d'une force protomotrice

## D. LA CHIMIOSYNTHESE : SYNTHÈSE DE MATIÈRE ORGANIQUE À PARTIR D'ÉNERGIE CHIMIQUE

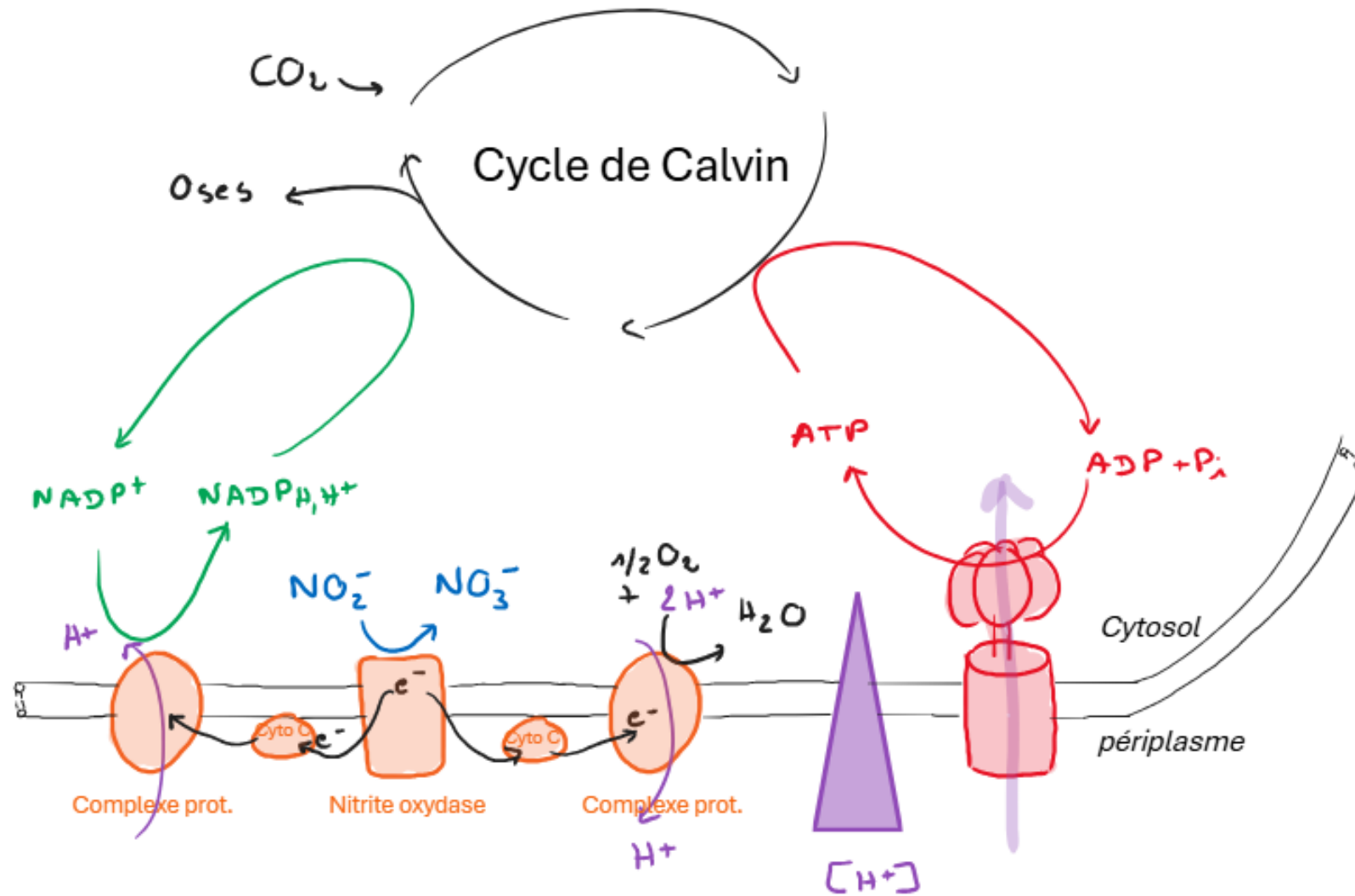
### I. La chaîne de transporteurs d'électrons de nitrobacter : couplage chimio osmotique et osmo chimique

#### I.1. Chaîne de transporteurs d'électrons

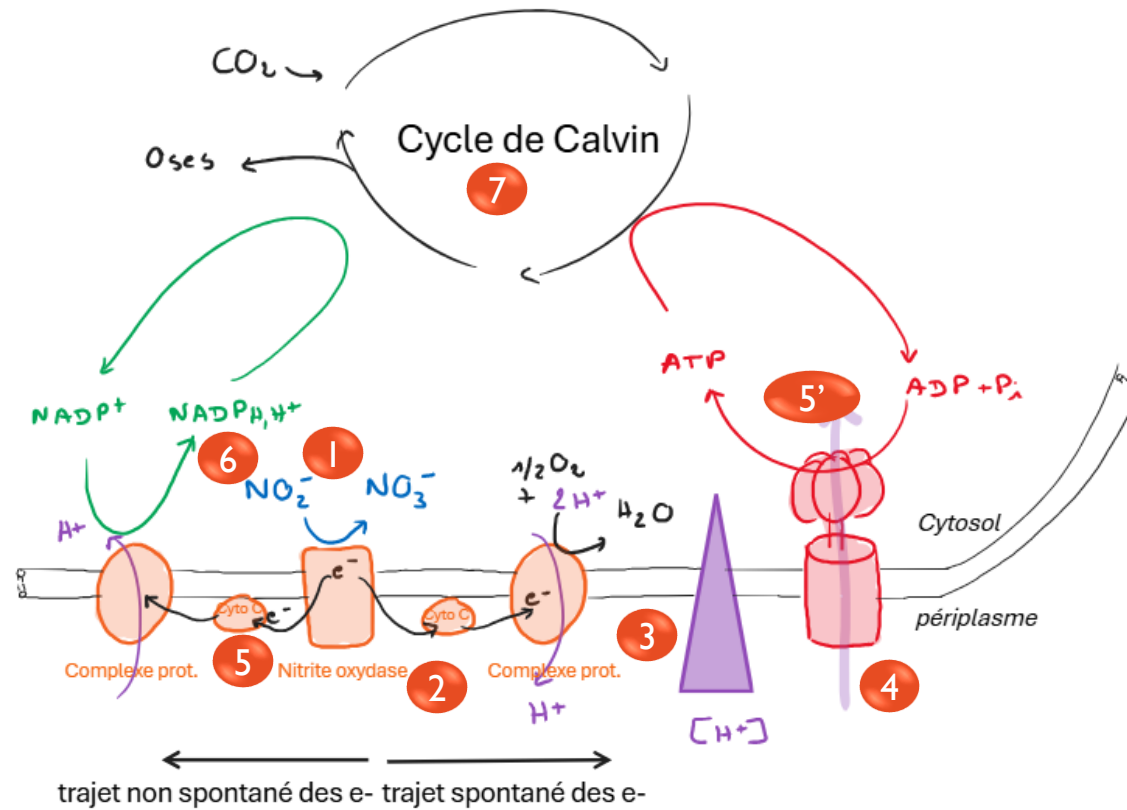
- Le donneur initial d'électron est le  $\text{NO}_2^-$  (nitrite) qui est donc oxydé en  $\text{NO}_3^-$  (nitrate) selon la  $\frac{1}{2}$  réaction redox :
 
$$\text{NO}_2^- + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{NO}_3^- + 2 e^- + 2 \text{H}^+$$
- Les électrons libérés peuvent ensuite être transférés vers deux accepteurs finaux possibles :
  - soit ils sont transportés jusqu'à  $\text{O}_2$  qui est alors réduit en  $\text{H}_2\text{O}$ , selon la  $\frac{1}{2}$  réaction redox :
 
$$\frac{1}{2} \text{O}_2 + 2 e^- + 2 \text{H}^+ \rightleftharpoons \text{H}_2\text{O}$$
  - soit ils sont transportés jusqu'à  $\text{NAD}^+$  qui est alors réduit en  $\text{NADH}$ , selon la  $\frac{1}{2}$  réaction redox :
 
$$\text{NADP}^+ + 2 e^- + 2 \text{H}^+ \rightleftharpoons \text{NADPH}, \text{H}^+$$



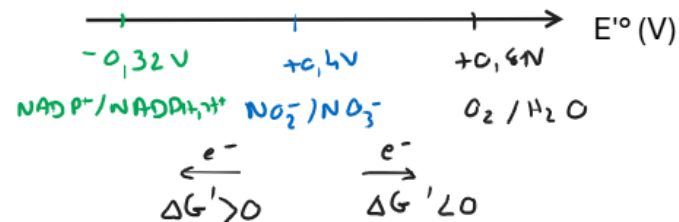
Chaîne de transporteurs d'électrons chez le **genre Nitrobacter** :  $\text{NO}_2^-$  (nitrite) sont la source d'électrons (source Vuibert)



Chaîne de transporteurs d'électrons chez le **genre Nitrobacter** :  $\text{NO}_2^-$  (nitrite) sont la source d'électrons



=> utilisation de la force proto-motrice (couplage osmo-chimique)  
 => mise en place d'un gradient de  $\text{H}^+$  (couplage chimio-osmotique)



Chaîne de transporteurs d'électrons chez le **genre Nitrobacter** :  $\text{NO}_2^-$  (nitrite) sont la source d'électrons

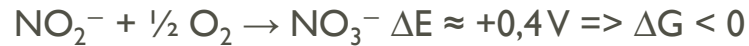
## D. LA CHIMIOSYNTHESE : SYNTHÈSE DE MATIÈRE ORGANIQUE À PARTIR D'ÉNERGIE CHIMIQUE

### I. La chaîne de transporteurs d'électrons de nitrobacter : couplage chimio osmotique et osmo chimique

#### I.2. Aspect énergétique

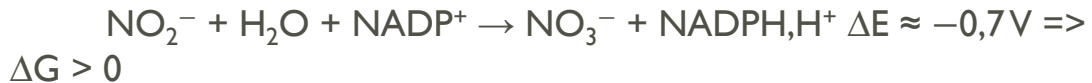
Deux réactions redox dans cette chaîne de transport d'électrons:

- une oxydation du  $\text{NO}_2^-$  par l' $\text{O}_2$  selon la réaction suivante :



=> réaction exergonique couplée à une translocation de protons → couplage chimioosmotique.

- une oxydation du  $\text{NO}_2^-$  par le  $\text{NAD}^+$  selon la réaction suivante :



=> réaction endergonique permise grâce au couplage avec un flux de protons exergonique → couplage osmochimique.

- Au final, l'énergie libérée lors de l'oxydation du  $\text{NO}_2^-$  par  $\text{O}_2$  permet la constitution d'un gradient de protons, qui est ensuite utilisé en partie dans l'oxydation endergonique du  $\text{NO}_2^-$  par  $\text{NADP}^+$ . Le gradient de protons est également converti en partie en ATP grâce à l'ATP-synthase : c'est un autre couplage osmochimique.

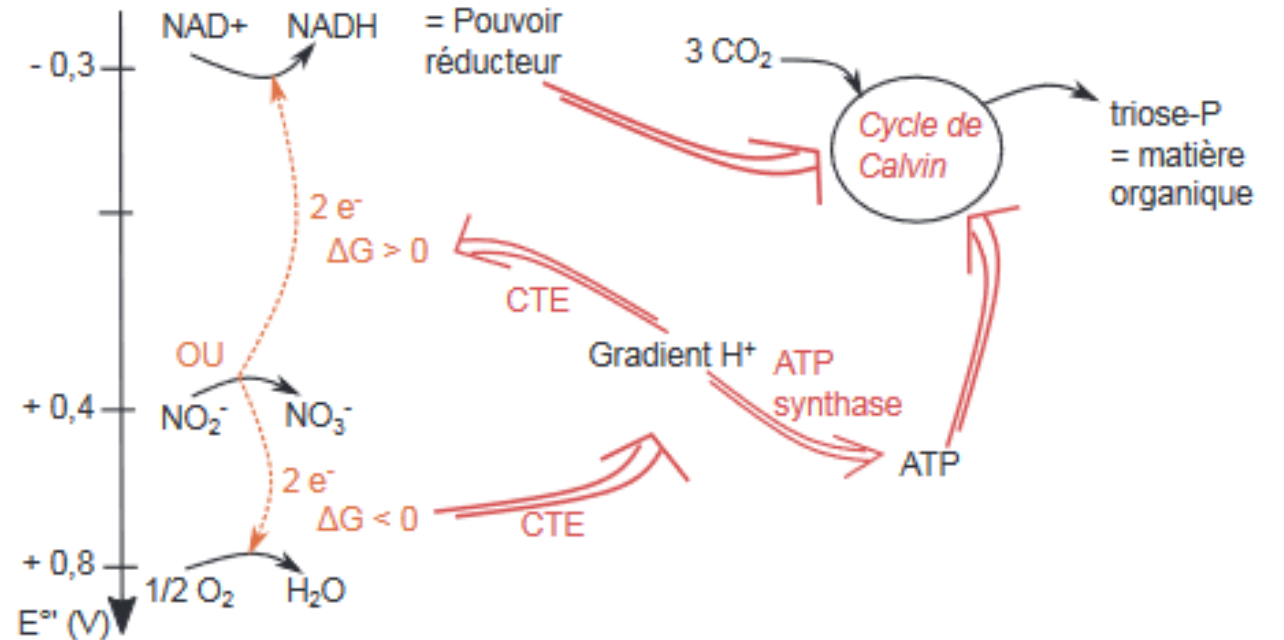


Figure 10.11 Couplages énergétiques chez *Nitrobacter*.

CTE : chaîne de transport d'électrons. Les flèches rouges représentent les couplages.

Couplages énergétiques chez les bactéries du genre *Nitrobacter* (source Dunod)

## D. LA CHIMIOSYNTHESE : SYNTHÈSE DE MATIÈRE ORGANIQUE À PARTIR D'ÉNERGIE CHIMIQUE

### 2. Nitrobacter est un exemple de chimiolithoautotrophie

1. Le donneur initial d'électron  $\text{NO}_2^-$  (nitrite)
2. Couplage chimio-osmotique: flux de protons vers périplasma
3. Couplage osmo-chimique: formation de pouvoir réducteur
4. Couplage osmo-chimique: Synthèse d'ATP
5. Utilisation du pouvoir réducteur et de l'ATP dans le cycle de Calvin → synthèse de matière organique = autotrophie au C

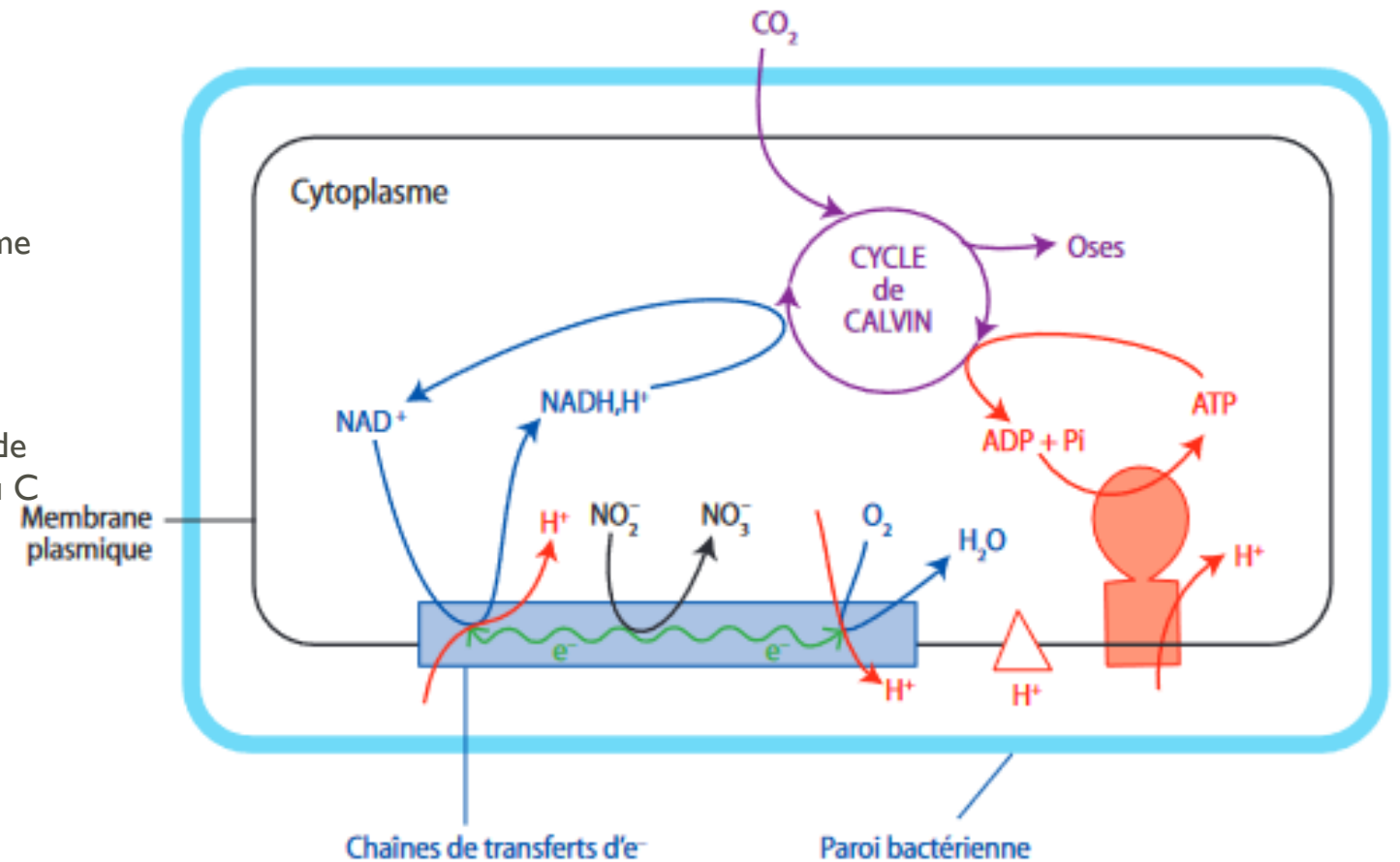
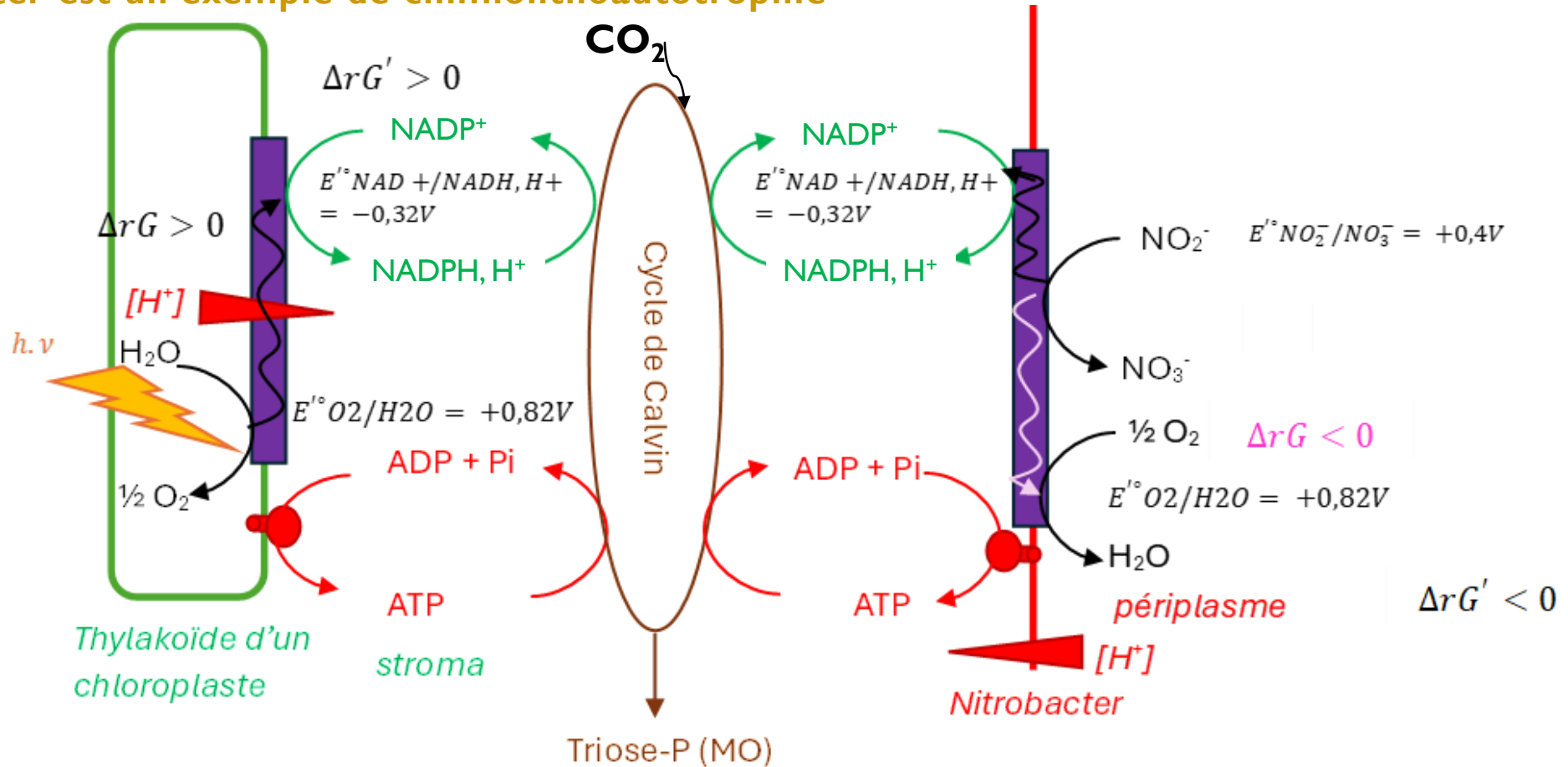


Schéma bilan du métabolisme de Nitrobacter, une bactérie nitrifiante (source Vuibert)

## D. LA CHIMIOSYNTHESE : SYNTHÈSE DE MATIÈRE ORGANIQUE À PARTIR D'ÉNERGIE CHIMIQUE

### 2. Nitrobacter est un exemple de chimiolithoautotrophie



PHOTOLITHOAUTOTROPHIE des unicellulaires photosynthétiques, des algues

CHIMIO LITHOAUTOTROPHIE AÉROBIE de Nitrobacter du sol

# SV-E-1 L'approvisionnement en matière organique Introduction : les formes d'énergie dans une cellule

## SV-E-I-A Les formes d'énergie dans la cellule

### I. Les besoins énergétiques cellulaires et leur couverture par des sources énergétiques diversifiées

- A. L'organisation fonctionnelle de l'état cellulaire est indissociable d'un flux énergétique
- B. Les principes thermodynamiques

### II. Les formes d'énergie dans la cellule

- A. Les énergies de réaction
- B. Les énergies de gradients
- C. Les énergies d'oxydo-réduction
- D. L'énergie mécanique

### III. Les couplages énergétiques

- A. Couplage chimio-osmotiques
- B. Couplage osmo-chimique
- C. Couplage osmo-osmotique
- D. Couplage chimio-chimique
- E. L'énergie de réaction permet de faire tourner un cycle

## SV-E-I-B Approvisionnement et devenir des molécules

### I. L'approvisionnement et le devenir des molécules organiques ou minérales dans les cellules

- A. La MO est nécessaire au métabolisme de la cellule
- B. Les cellules hétérotrophes prélèvent la MO
- C. Les cellules autotrophes réduisent la MN prélevée en MO

### II. La photosynthèse assure la réduction des MN en convertissant l'énergie lumineuse

- A. La photosynthèse : une réduction du C minéral
- B. Le cycle de Calvin
- C. La chaîne photosynthétique
- D. La chimiosynthèse: cas de Nitrobacter

## SV-E-IC Pièce centrale des voies du métabolisme énergétique : l'ATP, un coenzyme nucléotidique de transfert de phosphoryle

### I. L'énergie d'hydrolyse d'un coenzyme nucléotidique, l'ATP

- A. Les liaisons phosphoanhydrides
- B.  $\Delta rG^{o'}$  et  $\Delta rG'$  d'hydrolyse de l'ATP
- C. La position intermédiaire du potentiel d'hydrolyse de l'ATP

### II. De nombreuses transformations cellulaires exploitent des transferts de phosphoryle : utilisation majeure de l'ATP

- A. Des réactions de transfert de phosphoryle
- B. Le bilan sur les transferts de phosphoryle

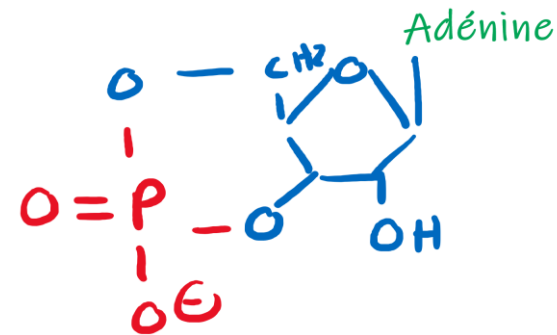
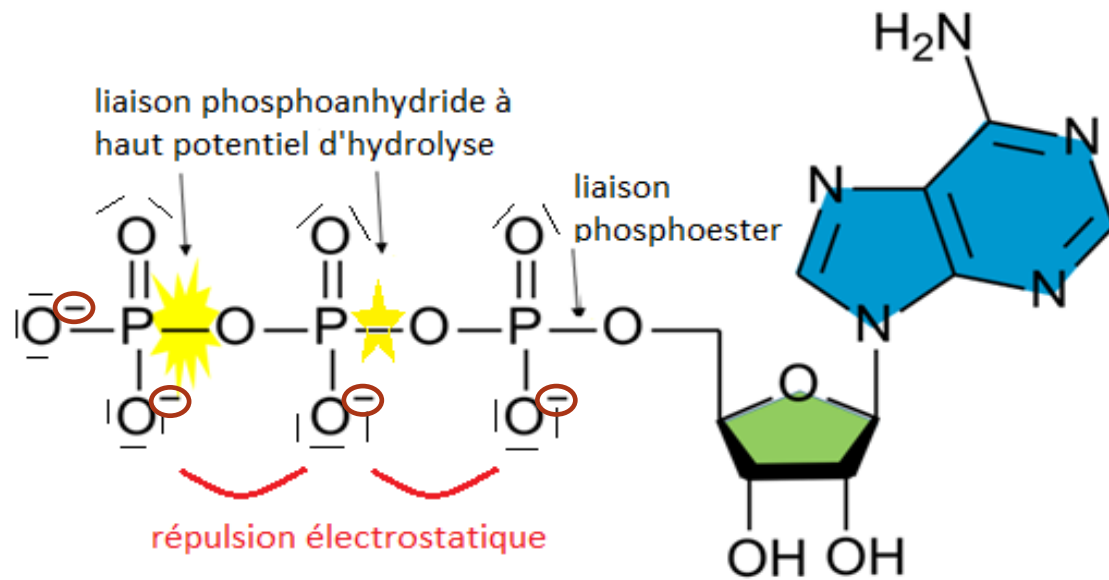
### III. Les couplages permettant la synthèse d'ATP

- A. La formation d'ATP par transphosphorylation
- B. La formation d'ATP par conversion d'une force protomotrice

# SV-E-IC. PIÈCE CENTRALE DES VOIES DU MÉTABOLISME ÉNERGÉTIQUE : L'ATP, UN COENZYME NUCLÉOTIDIQUE DE TRANSFERT DE PHOSPHORYLE

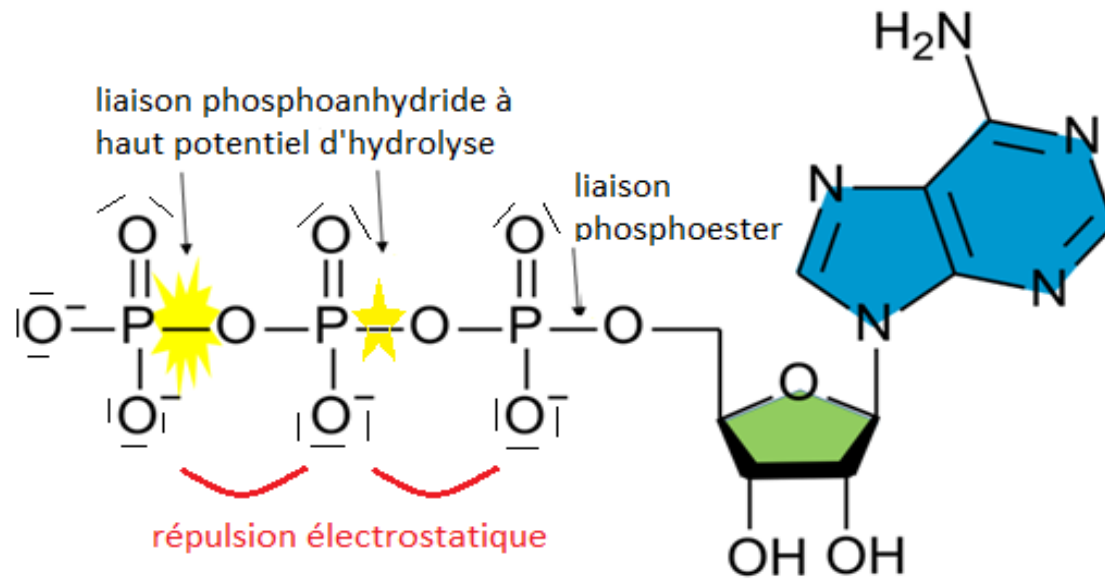
## I. L'ÉNERGIE D'HYDROLYSE D'UN COENZYME NUCLÉOTIDIQUE, L'ATP

### A. LES LIAISONS PHOSPHOANHYDRIDES: DES LIAISONS INSTABLES, À HAUT POTENTIEL D'HYDROLYSE



AMP cyclique

Structure de l'Adénosine Tri Phosphate



### énergie potentielle de répulsion électrostatique

vitesse d'hydrolyse de l'ATP en solution aqueuse très faible, énergie d'activation très élevée  
=> ATP est instable mais métastable (grande E<sub>a</sub>)

# SV-E-1 L'approvisionnement en matière organique Introduction : les formes d'énergie dans une cellule

## SV-E-I-A Les formes d'énergie dans la cellule

### I. Les besoins énergétiques cellulaires et leur couverture par des sources énergétiques diversifiées

- A. L'organisation fonctionnelle de l'état cellulaire est indissociable d'un flux énergétique
- B. Les principes thermodynamiques

### II. Les formes d'énergie dans la cellule

- A. Les énergies de réaction
- B. Les énergies de gradients
- C. Les énergies d'oxydo-réduction
- D. L'énergie mécanique

### III. Les couplages énergétiques

- A. Couplage chimio-osmotiques
- B. Couplage osmo-chimique
- C. Couplage osmo-osmotique
- D. Couplage chimio-chimique
- E. L'énergie de réaction permet de faire tourner un cycle

## SV-E-I-B Approvisionnement et devenir des molécules

### I. L'approvisionnement et le devenir des molécules organiques ou minérales dans les cellules

- A. La MO est nécessaire au métabolisme de la cellule
- B. Les cellules hétérotrophes prélèvent la MO
- C. Les cellules autotrophes réduisent la MN prélevée en MO

### II. La photosynthèse assure la réduction des MN en convertissant l'énergie lumineuse

- A. La photosynthèse : une réduction du C minéral
- B. Le cycle de Calvin
- C. La chaîne photosynthétique
- D. La chimiosynthèse: cas de Nitrobacter

## SV-E-IC Pièce centrale des voies du métabolisme énergétique : l'ATP, un coenzyme nucléotidique de transfert de phosphoryle

### I. L'énergie d'hydrolyse d'un coenzyme nucléotidique, l'ATP

- A. Les liaisons phosphoanhydrides
- B.  $\Delta rG^{\circ}$  et  $\Delta rG'$  d'hydrolyse de l'ATP
- C. La position intermédiaire du potentiel d'hydrolyse de l'ATP

### II. De nombreuses transformations cellulaires exploitent des transferts de phosphoryle : utilisation majeure de l'ATP

- A. Des réactions de transfert de phosphoryle
- B. Le bilan sur les transferts de phosphoryle

### III. Les couplages permettant la synthèse d'ATP

- A. La formation d'ATP par transphosphorylation
- B. La formation d'ATP par conversion d'une force protomotrice

## B. $\Delta_R G^{\circ}$ ET $\Delta_R G'$ D'HYDROLYSE DE L'ATP

$$\Delta rG^{\circ} = -30,5 \text{ kJ.mol}^{-1}$$

L'enthalpie libérée par l'hydrolyse de l'ATP est variable selon les tissus.



$$\Delta rG^{\circ} = -30,5 \text{ kJ/mol}$$

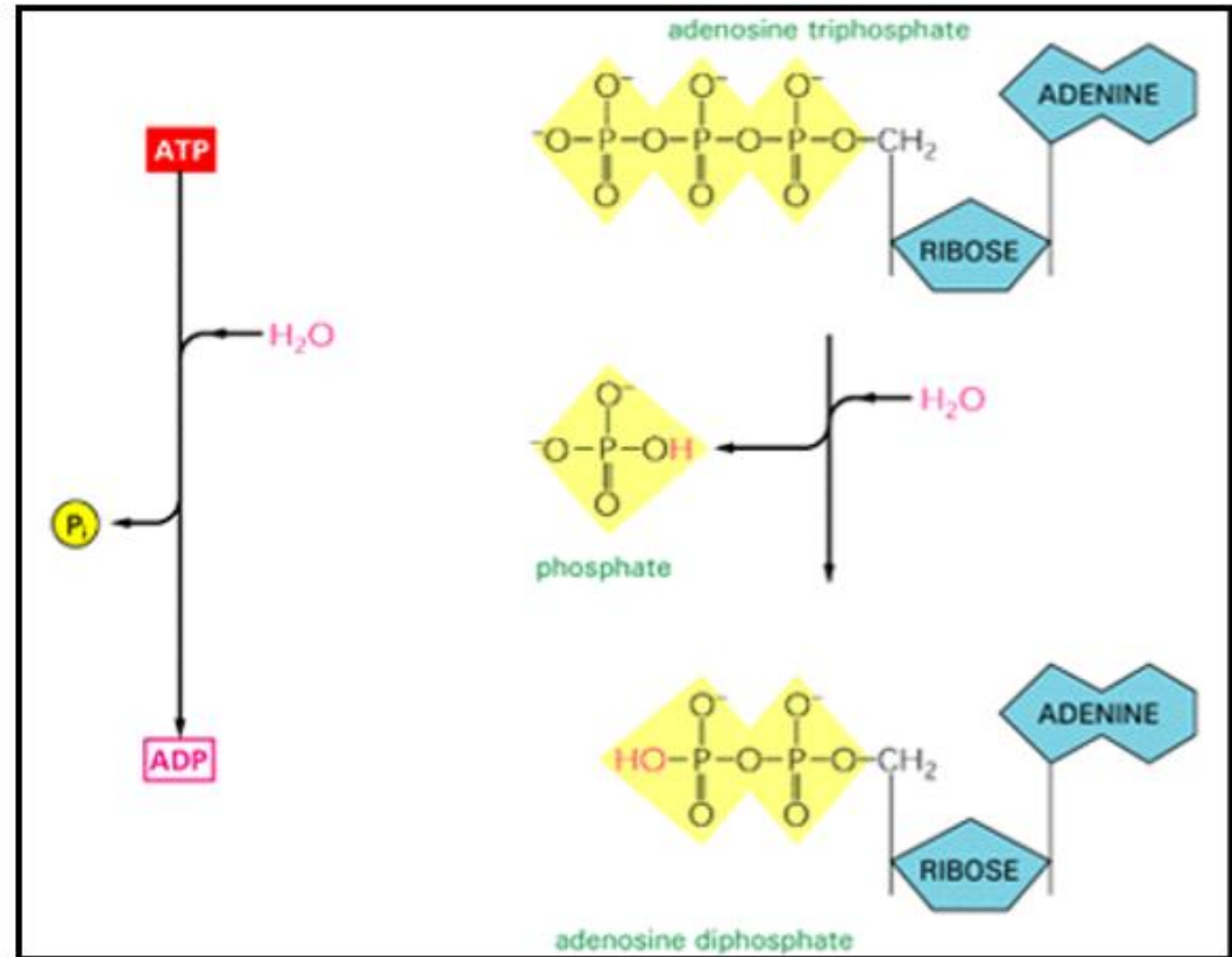
Quand on hydrolyse l'ATP, on obtient

$$\Delta rG' = \Delta rG^{\circ} + RT \ln \left( \frac{[\text{ADP}][\text{P}_i]}{[\text{ATP}]} \right)$$

Une cellule a toujours un excès d'ATP (sauf si stress) par rapport à ADP

$$\Rightarrow \Delta rG' \ll -30,5 \text{ kJ/mol}$$

Dans une cellule on peut obtenir 50kJ/mol d'ATP hydrolysée



# SV-E-1 L'approvisionnement en matière organique Introduction : les formes d'énergie dans une cellule

## SV-E-I-A Les formes d'énergie dans la cellule

### I. Les besoins énergétiques cellulaires et leur couverture par des sources énergétiques diversifiées

- A. L'organisation fonctionnelle de l'état cellulaire est indissociable d'un flux énergétique
- B. Les principes thermodynamiques

### II. Les formes d'énergie dans la cellule

- A. Les énergies de réaction
- B. Les énergies de gradients
- C. Les énergies d'oxydo-réduction
- D. L'énergie mécanique

### III. Les couplages énergétiques

- A. Couplage chimio-osmotiques
- B. Couplage osmo-chimique
- C. Couplage osmo-osmotique
- D. Couplage chimio-chimique
- E. L'énergie de réaction permet de faire tourner un cycle

## SV-E-I-B Approvisionnement et devenir des molécules

### I. L'approvisionnement et le devenir des molécules organiques ou minérales dans les cellules

- A. La MO est nécessaire au métabolisme de la cellule
- B. Les cellules hétérotrophes prélèvent la MO
- C. Les cellules autotrophes réduisent la MN prélevée en MO

### II. La photosynthèse assure la réduction des MN en convertissant l'énergie lumineuse

- A. La photosynthèse : une réduction du C minéral
- B. Le cycle de Calvin
- C. La chaîne photosynthétique
- D. La chimiosynthèse: cas de Nitrobacter

## SV-E-IC Pièce centrale des voies du métabolisme énergétique : l'ATP, un coenzyme nucléotidique de transfert de phosphoryle

### I. L'énergie d'hydrolyse d'un coenzyme nucléotidique, l'ATP

- A. Les liaisons phosphoanhydrides
- B.  $\Delta rG^{o'}$  et  $\Delta rG'$  d'hydrolyse de l'ATP
- C. La position intermédiaire du potentiel d'hydrolyse de l'ATP

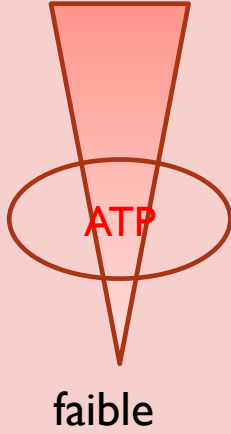
### II. De nombreuses transformations cellulaires exploitent des transferts de phosphoryle : utilisation majeure de l'ATP

- A. Des réactions de transfert de phosphoryle
- B. Le bilan sur les transferts de phosphoryle

### III. Les couplages permettant la synthèse d'ATP

- A. La formation d'ATP par transphosphorylation
- B. La formation d'ATP par conversion d'une force protomotrice

## C. POSITION INTERMÉDIAIRE DU POTENTIEL D'HYDROLYSE $\Delta_r G^{\circ}$ DE L'ATP

composés	$\Delta_r G^{\circ}$ kJ.mol <sup>-1</sup>	en	Types de liaison	Potentiel de transfert	Sens de transfert spontané
<b>PEP (phosphoénolpyruvate)</b>	-61,9	Liaisons à haut potentiel d'hydrolyse		élevé	
<b>1,3 -Bisphosphoglycérate</b>	-49,4				
<b>Phosphocréatine</b>	-43,1				
<b>ATP → AMP + PPi</b>	-32,2				
<b>ATP → ADP + Pi</b>	-30,5				
<b>Glucose 1-Phosphate</b>	-20,9	Liaisons à faible potentiel d'hydrolyse		faible	
<b>Fructose 6-phosphate</b>	-13,8				
<b>Glucose 6-phosphate</b>	-13,8				

*Potentiel d'hydrolyse de quelques composés phosphorylés (dans Segarra, 2017)*



Comment les cellules utilisent-elles le potentiel énergétique de l'ATP?

# SV-E-1 L'approvisionnement en matière organique Introduction : les formes d'énergie dans une cellule

## SV-E-I-A Les formes d'énergie dans la cellule

### I. Les besoins énergétiques cellulaires et leur couverture par des sources énergétiques diversifiées

- A. L'organisation fonctionnelle de l'état cellulaire est indissociable d'un flux énergétique
- B. Les principes thermodynamiques

### II. Les formes d'énergie dans la cellule

- A. Les énergies de réaction
- B. Les énergies de gradients
- C. Les énergies d'oxydo-réduction
- D. L'énergie mécanique

### III. Les couplages énergétiques

- A. Couplage chimio-osmotiques
- B. Couplage osmo-chimique
- C. Couplage osmo-osmotique
- D. Couplage chimio-chimique
- E. L'énergie de réaction permet de faire tourner un cycle

## SV-E-I-B Approvisionnement et devenir des molécules

### I. L'approvisionnement et le devenir des molécules organiques ou minérales dans les cellules

- A. La MO est nécessaire au métabolisme de la cellule
- B. Les cellules hétérotrophes prélèvent la MO
- C. Les cellules autotrophes réduisent la MN prélevée en MO

### II. La photosynthèse assure la réduction des MN en convertissant l'énergie lumineuse

- A. La photosynthèse : une réduction du C minéral
- B. Le cycle de Calvin
- C. La chaîne photosynthétique
- D. La chimiosynthèse: cas de Nitrobacter

## SV-E-IC Pièce centrale des voies du métabolisme énergétique : l'ATP, un coenzyme nucléotidique de transfert de phosphoryle

### I. L'énergie d'hydrolyse d'un coenzyme nucléotidique, l'ATP

- A. Les liaisons phosphoanhydrides
- B.  $\Delta rG^{o'}$  et  $\Delta rG'$  d'hydrolyse de l'ATP
- C. La position intermédiaire du potentiel d'hydrolyse de l'ATP

### II. De nombreuses transformations cellulaires exploitent des transferts de phosphoryle : utilisation majeure de l'ATP

- A. Des réactions de transfert de phosphoryle
- B. Le bilan sur les transferts de phosphoryle

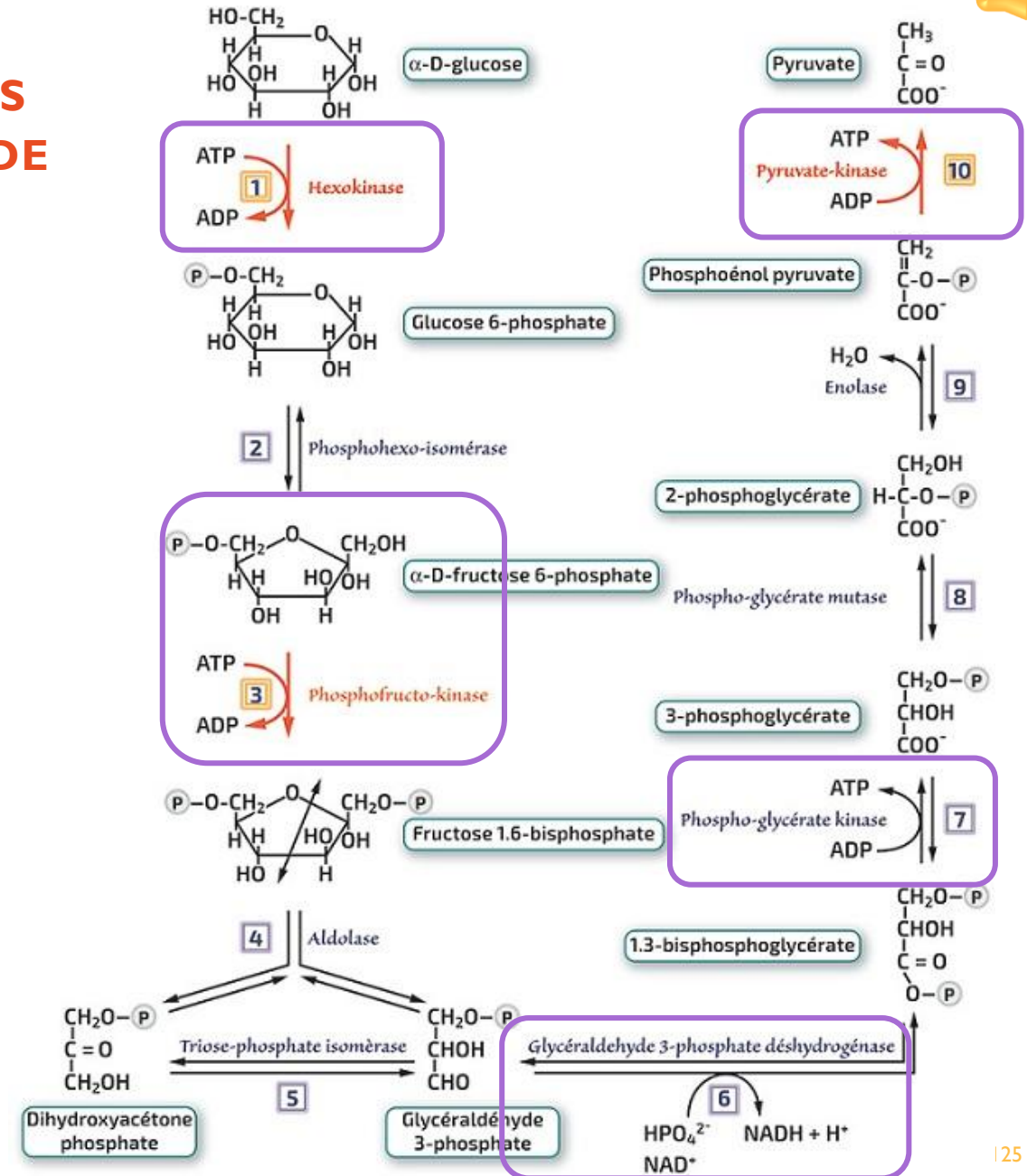
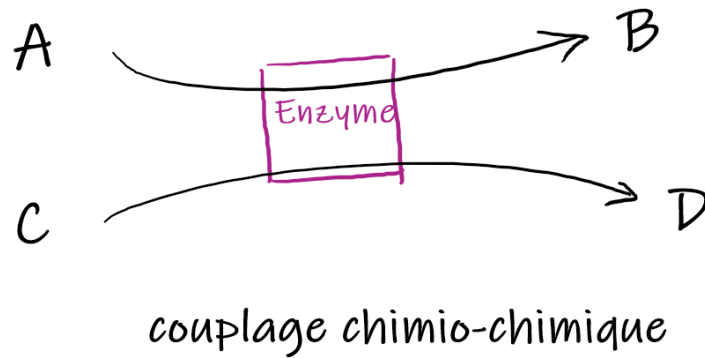
### III. Les couplages permettant la synthèse d'ATP

- A. La formation d'ATP par transphosphorylation
- B. La formation d'ATP par conversion d'une force protomotrice

## II. DE NOMBREUSES TRANSFORMATIONS CELLULAIRES EXPLOITENT DES TRANSFERTS DE PHOSPHORYLE : UTILISATION MAJEURE DE L'ATP

### A. RÉACTIONS DE TRANSFERTS DE PHOSPHORYLE

I. Transfert de groupements phosphates sur des substrats organiques pour les activer

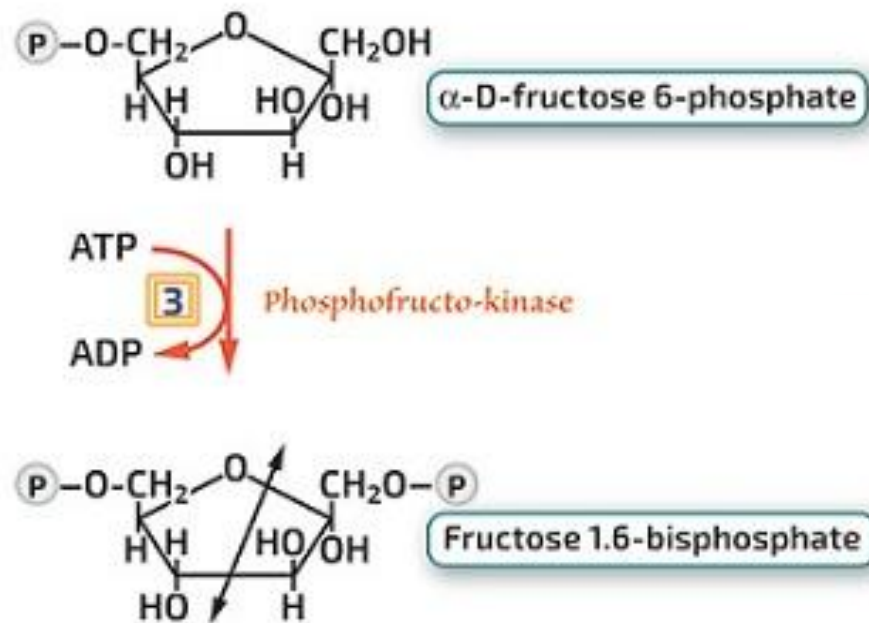


## II. DE NOMBREUSES TRANSFORMATIONS CELLULAIRES EXPLOITENT DES TRANSFERTS DE PHOSPHORYLE : UTILISATION MAJEURE DE L'ATP



### A. RÉACTIONS DE TRANSFERTS DE PHOSPHORYLE

#### I. Transfert de groupements phosphates sur des substrats organiques pour les activer



La glycolyse est  
hyaloplasmique

*Illustration du transfert de groupement phosphate dans une étape de la glycolyse*

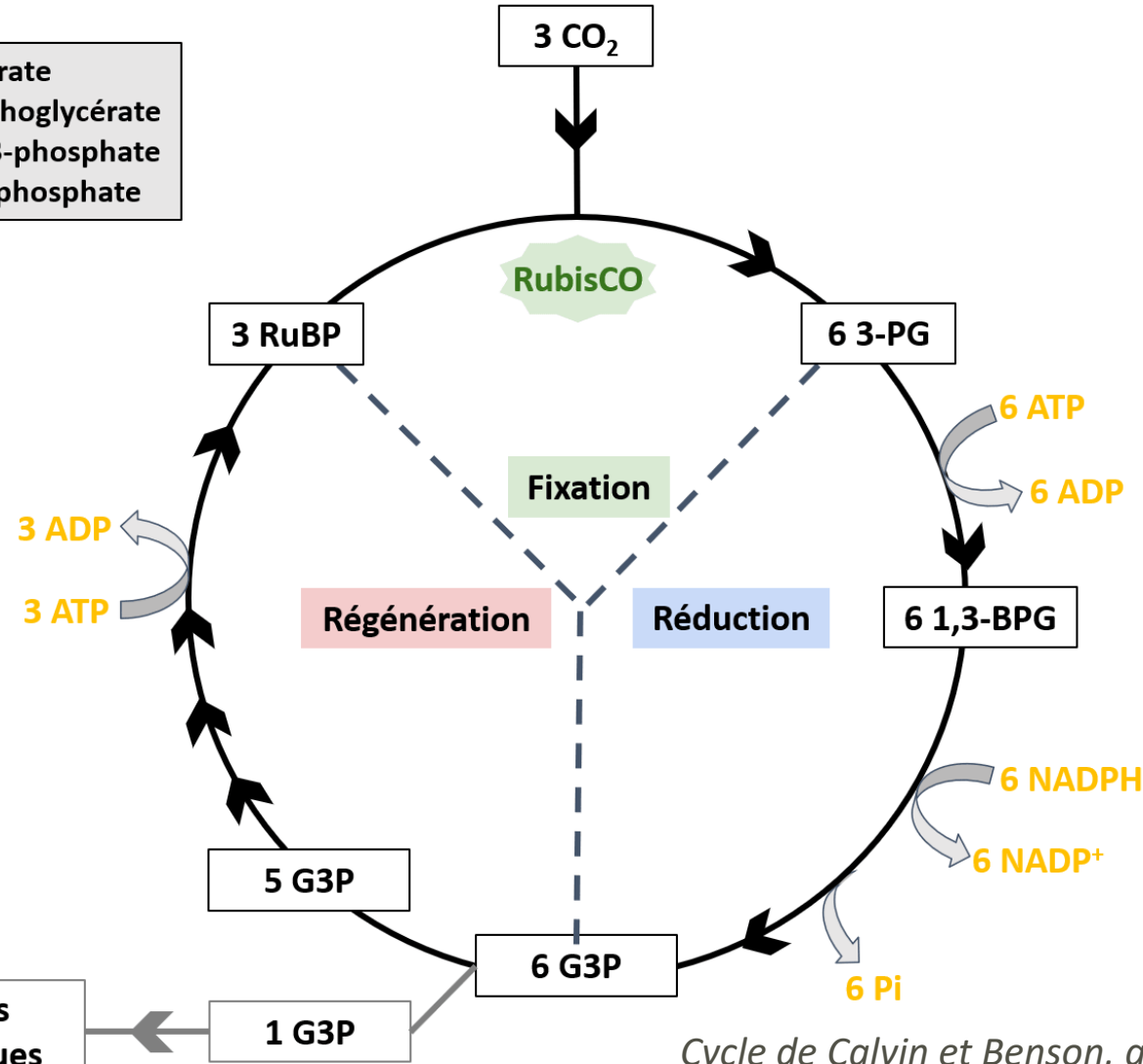
## II. DE NOMBREUSES TRANSFORMATIONS CELLULAIRES EXPLOITENT DES TRANSFERTS DE PHOSPHORYLE : UTILISATION MAJEURE DE L'ATP

### A. RÉACTIONS DE TRANSFERTS DE PHOSPHORYLE

#### I. Transfert de groupements phosphates sur des substrats organiques pour les activer

3-PG = 3-phosphoglycérate  
1,3-BPG = 1,3-bisphosphoglycérate  
G3P = glycéraldéhyde-3-phosphate  
RuBP = ribulose 1,5 bisphosphate

Biologie101.fr



- Phase chimique (phase sombre) de la photosynthèse:
  - réoxydation des intermédiaires (coenzymes NADPH, H<sup>+</sup>)
  - hydrolyse de l'ATP pour l'assimilation du carbone minéral en carbone organique

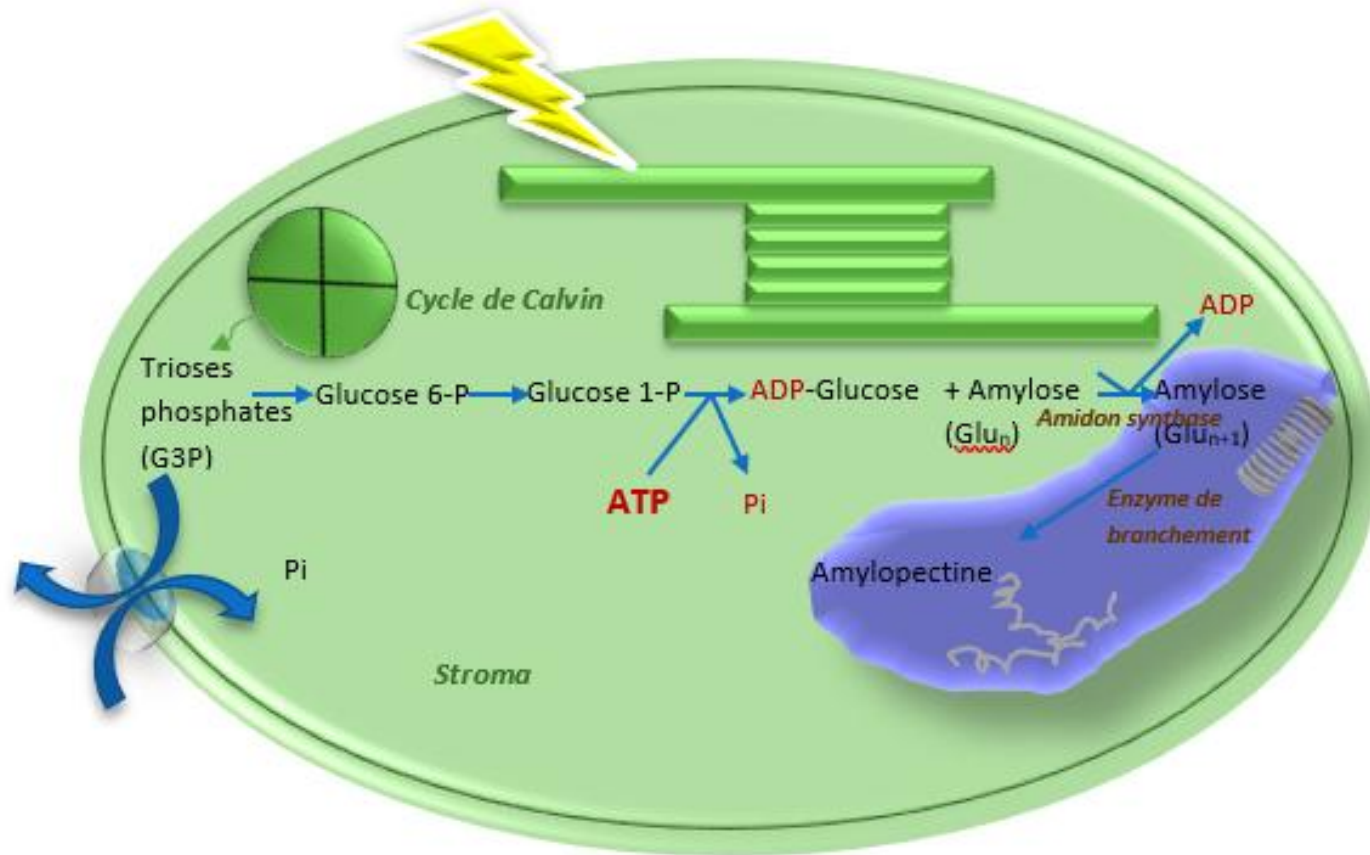
Cycle de Calvin et Benson, assimilation du carbone minéral (CO<sub>2</sub>) en carbone organique (3-PG)

## II. DE NOMBREUSES TRANSFORMATIONS CELLULAIRES EXPLOITENT DES TRANSFERTS

### DE PHOSPHORYLE : UTILISATION MAJEURE DE L'ATP

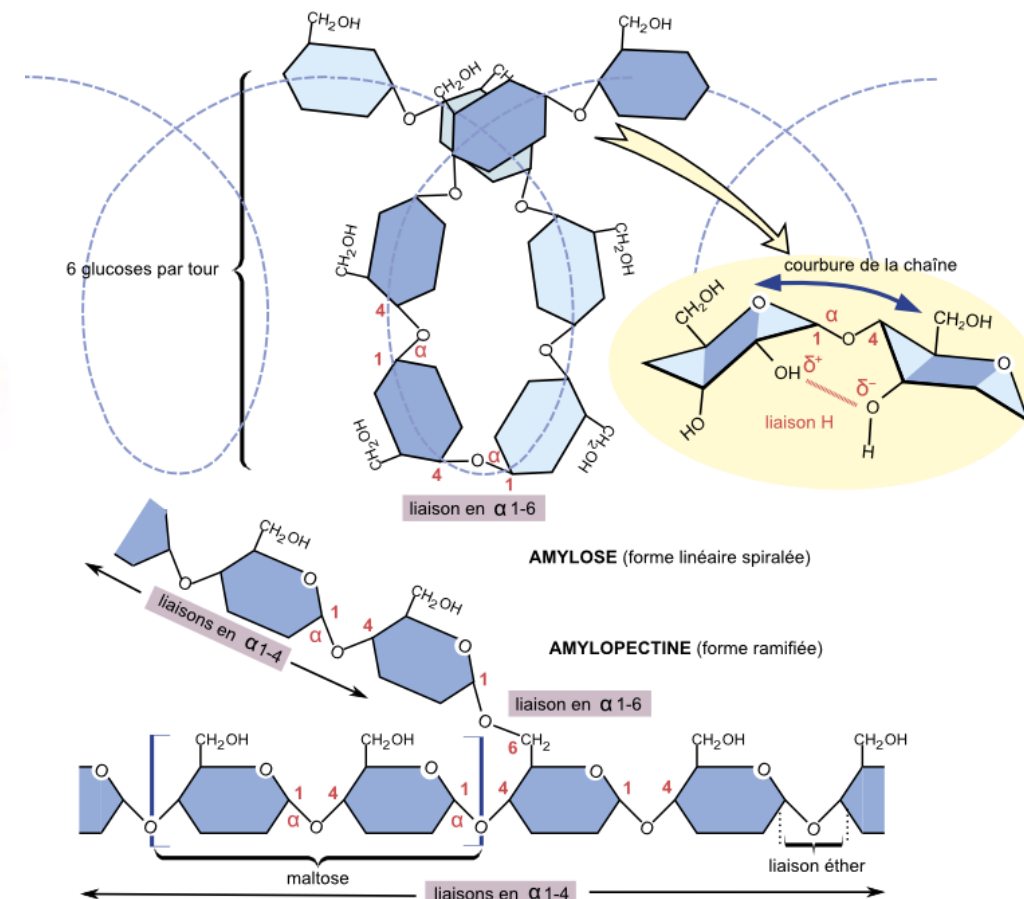
#### A. RÉACTIONS DE TRANSFERTS DE PHOSPHORYLE

##### I. Transfert de groupements phosphates sur des substrats organiques pour les activer



Polymérisation de cellulose, et d'amidon passe par une activation des glucoses

- Pour faire cellulose : UDP-glucose
- Pour faire amidon : ADP-glucose



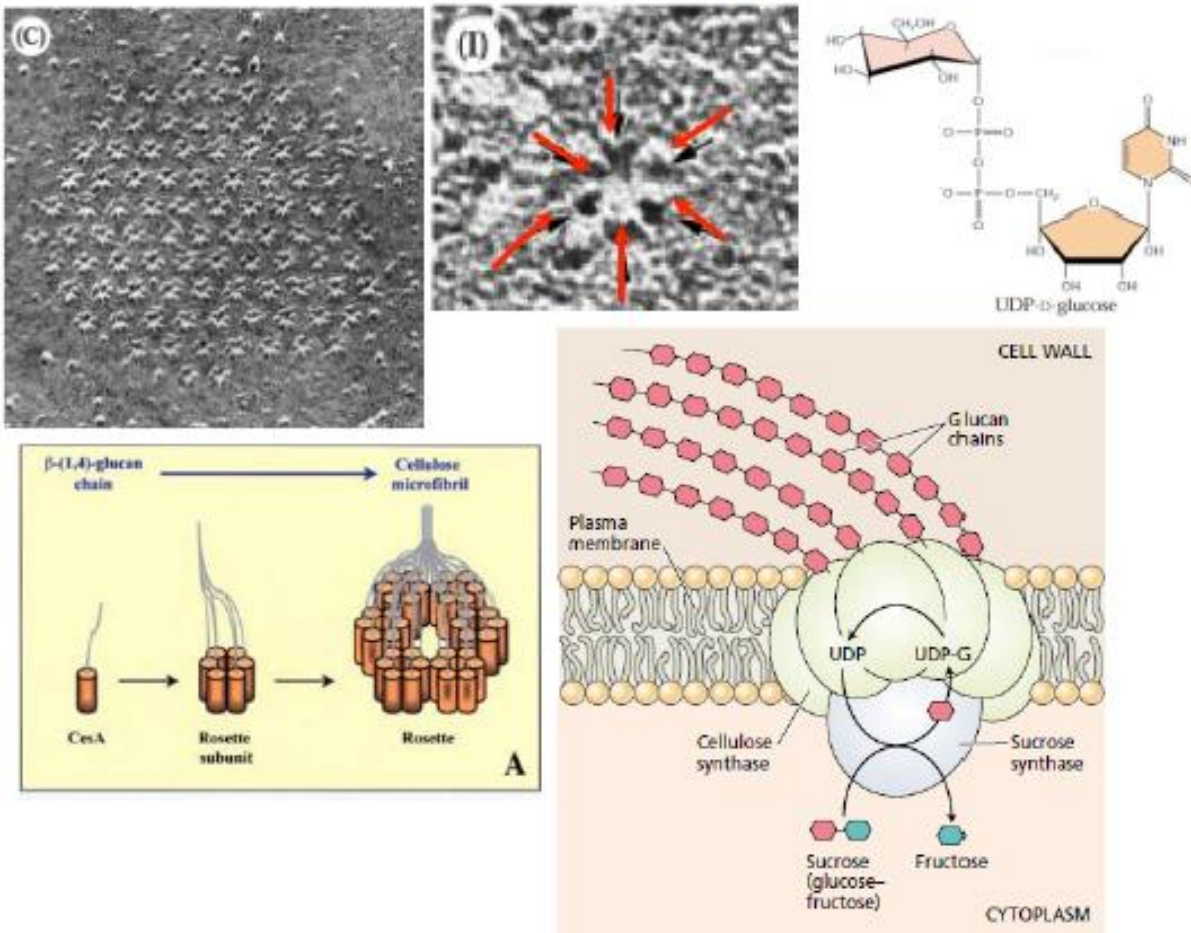
Dans le chloroplaste, la synthèse d'amidon passe par une activation du glucose par l'ATP (S. Dalaine)

# II. DE NOMBREUSES TRANSFORMATIONS CELLULAIRES EXPLOITENT DES TRANSFERTS DE PHOSPHORYLE : UTILISATION MAJEURE DE L'ATP

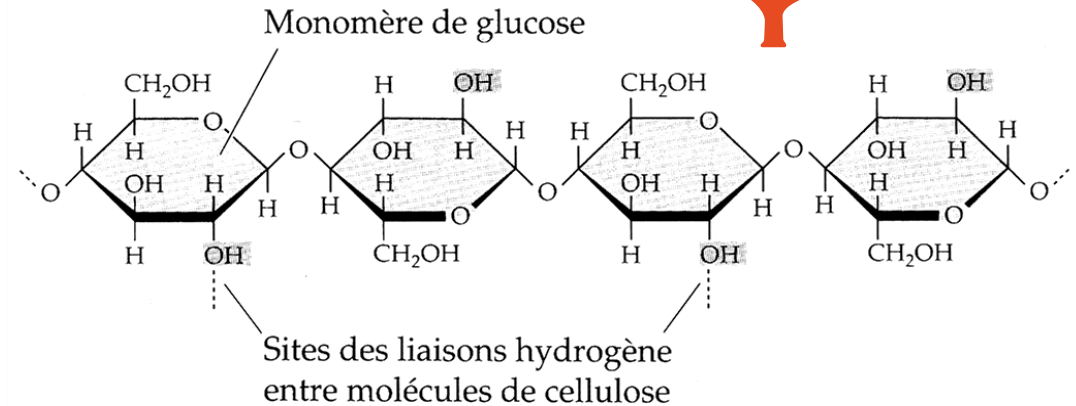
## A. RÉACTIONS DE TRANSFERTS DE PHOSPHORYLE

### I. Transfert de groupements phosphates sur des substrats organiques pour les activer

#### Le complexe de cellulose synthase



Polymérisation de cellulose, et d'amidon passe par une activation des glucoses  
Pour faire cellulose : UDP-glucose



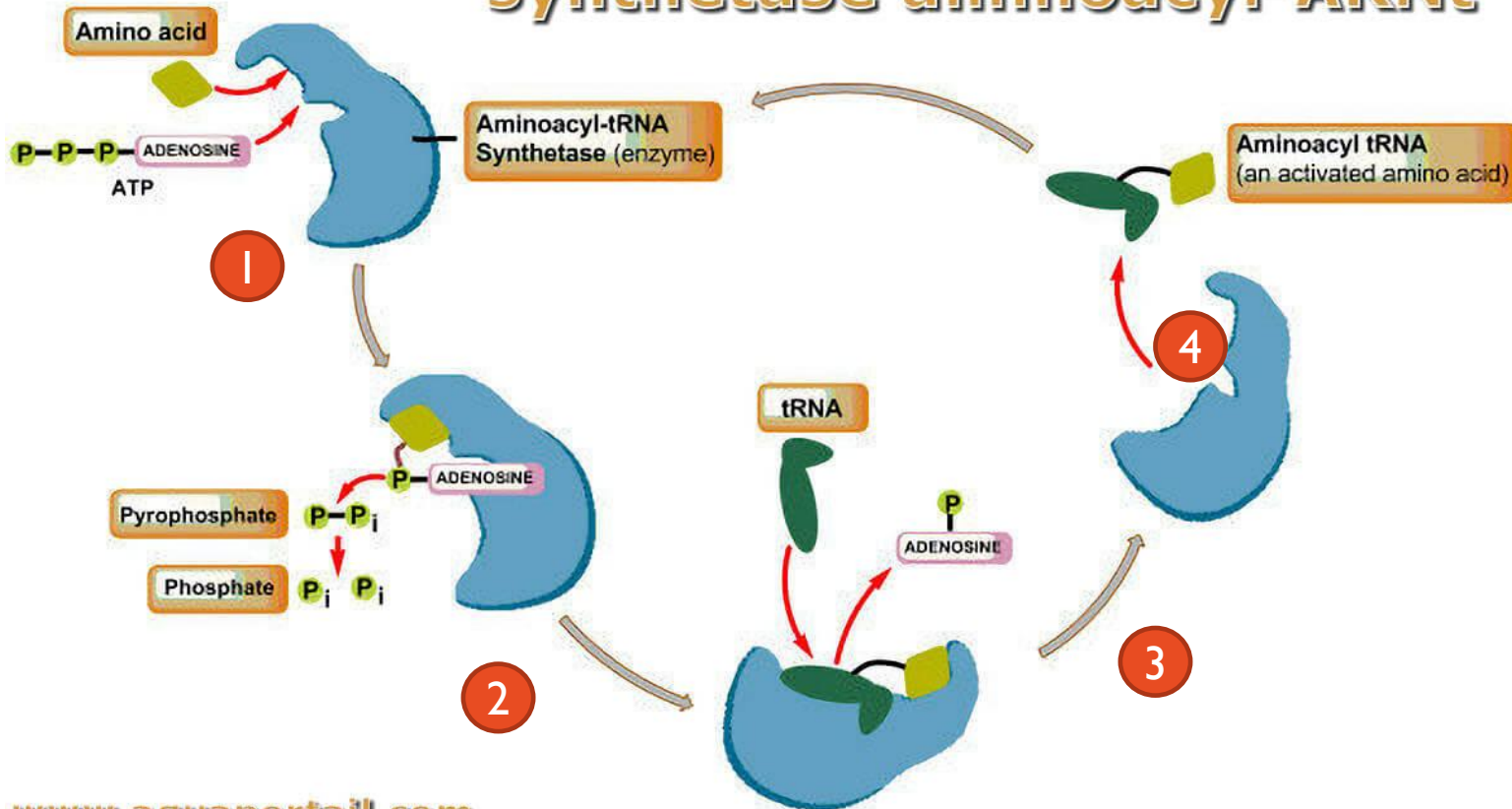
## II. DE NOMBREUSES TRANSFORMATIONS CELLULAIRES EXPLOITENT DES TRANSFERTS DE PHOSPHORYLE : UTILISATION MAJEURE DE L'ATP

Cf SV-F-2

### A. RÉACTIONS DE TRANSFERTS DE PHOSPHORYLE

#### I. Transfert de groupements phosphates sur des substrats organiques pour les activer

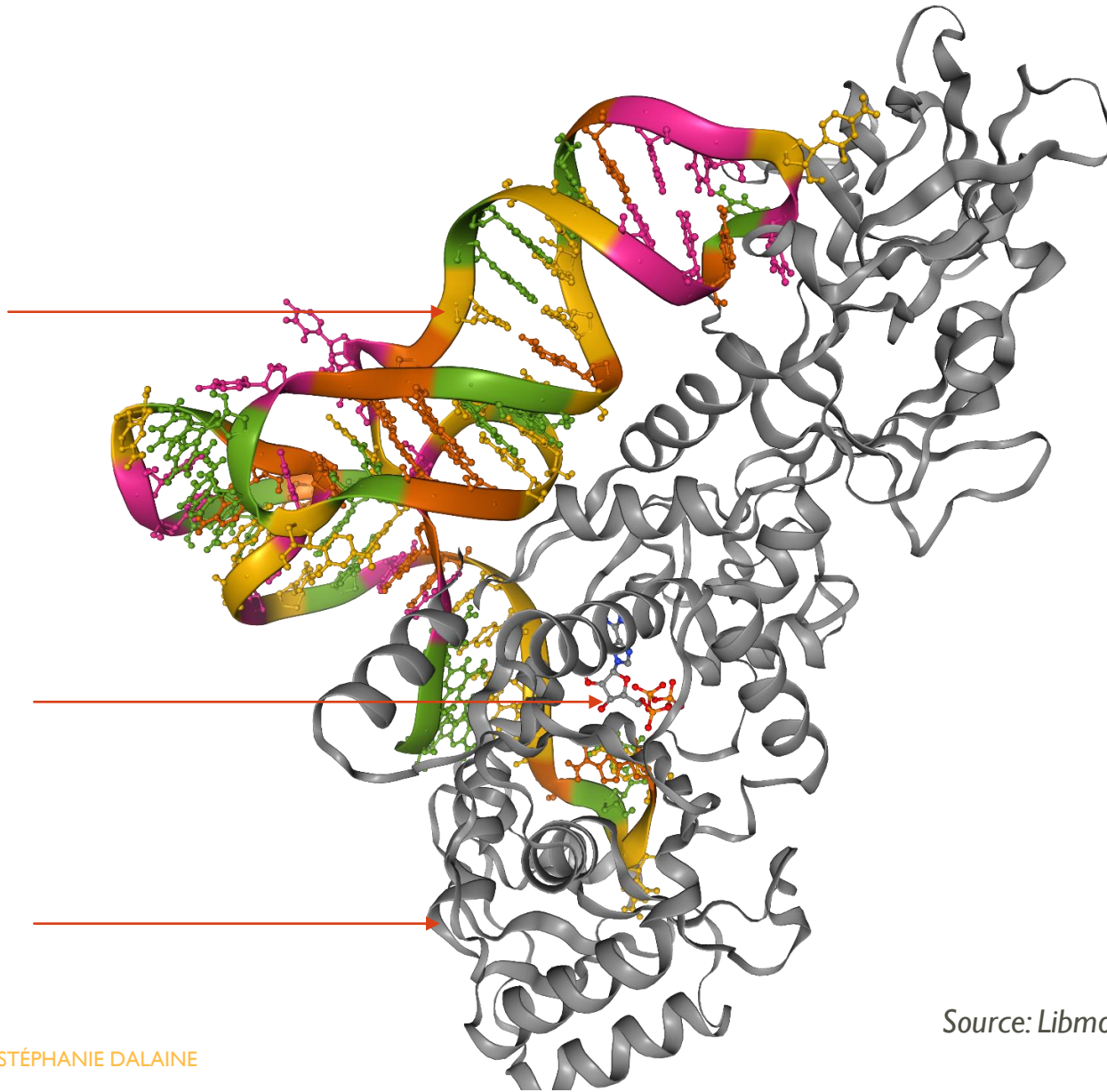
## synthétase aminoacyl-ARNt



- Activation des aa
- Aa accrochés aux ARNt nécessitent avant d'être activés, une liaison à un AMP
- Enzyme aminoacyl ARNt synthétase  
 $aa + ATP \rightleftharpoons aa-AMP + PP_i$   
 $aa-AMP + ARNt \rightleftharpoons aa-ARNt + AMP$

Triple stéréospécificité pour l' aminoacyl ARNt synthétase!

## I. Transfert de groupements phosphates sur des substrats organiques pour les activer



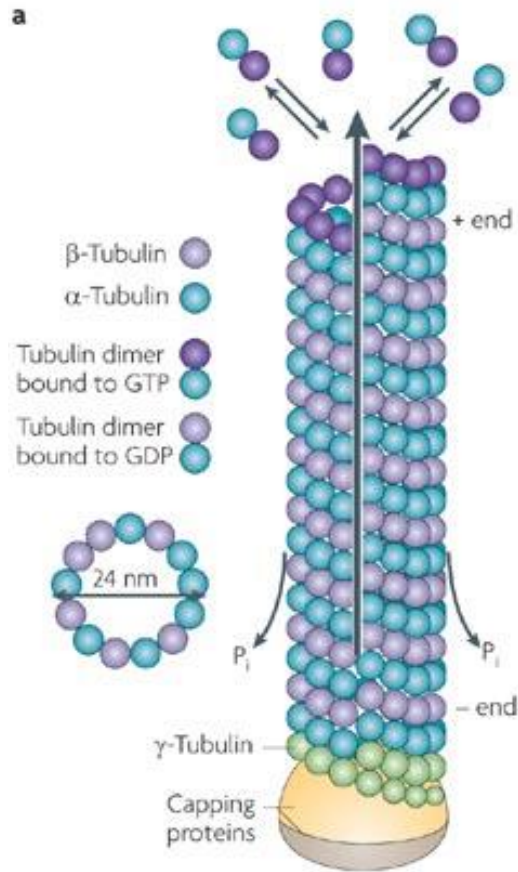
- Activation des aa
  - Aa accrochés aux ARNt nécessitent avant d'être activés, une liaison à un AMP
  - Enzyme aminoacyl ARNt synthétase
- $$\text{aa} + \text{ATP} \rightleftharpoons \text{aa-AMP} + \text{PPi}$$
- $$\text{aa-AMP} + \text{ARNt} \rightleftharpoons \text{aa-ARNt} + \text{AMP}$$

Triple stéréospécificité pour l'aminoacyl ARNt synthétase!

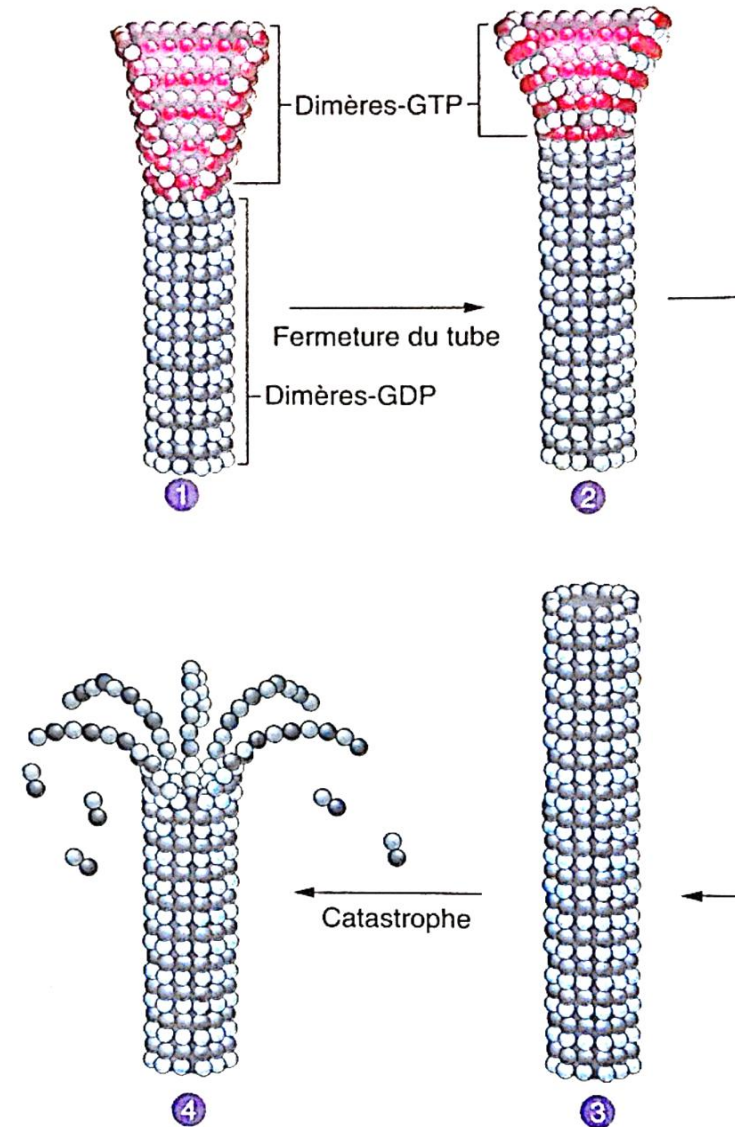
Source: Libmol, molécule IQRS

# I. Transfert de groupements phosphates sur des substrats organiques pour les activer

Cf SV-C-2

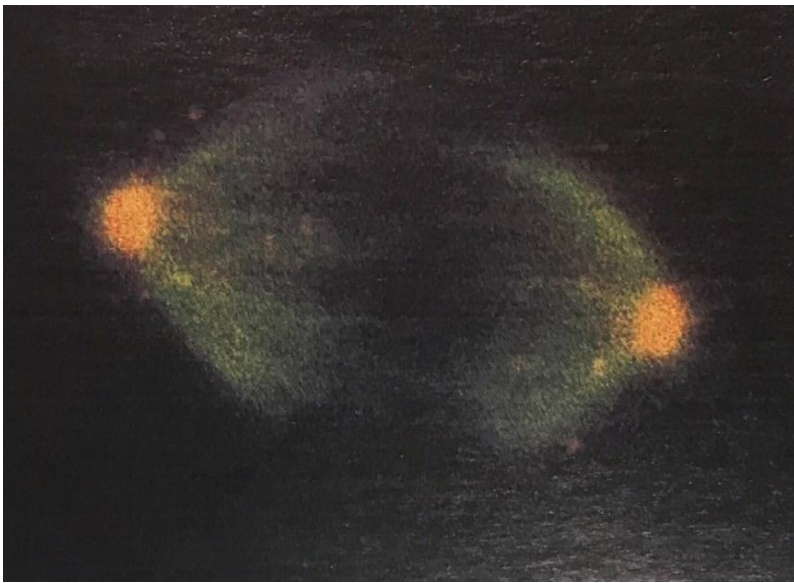


Activation des tubulines bêta par liaison à un GTP, le dimère  $\alpha\beta$  ainsi activé peut alors être incorporé à l'extrémité + du microtubule.



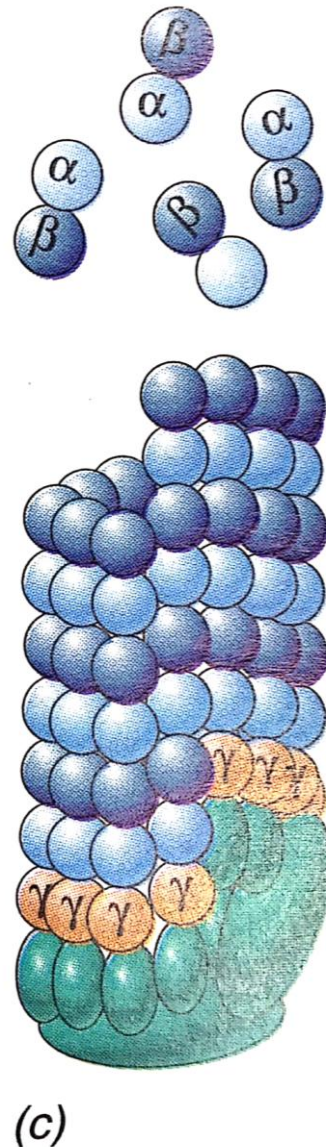
Modèle de l'instabilité dynamique basé sur la coiffe structurale.

Le GTP contribue à rendre l'extrémité + droite et rigide et permet la croissance du microtubule (Karp p352)



Fibroblaste en division doublement coloré par les anticorps anti tubuline  $\gamma$  (rouge) et anti tubuline  $\beta$  (vert).  
Karp p349

Le rôle de la gamma tubuline du MTOC dans l'initiation de la polymérisation de 13 protofilaments



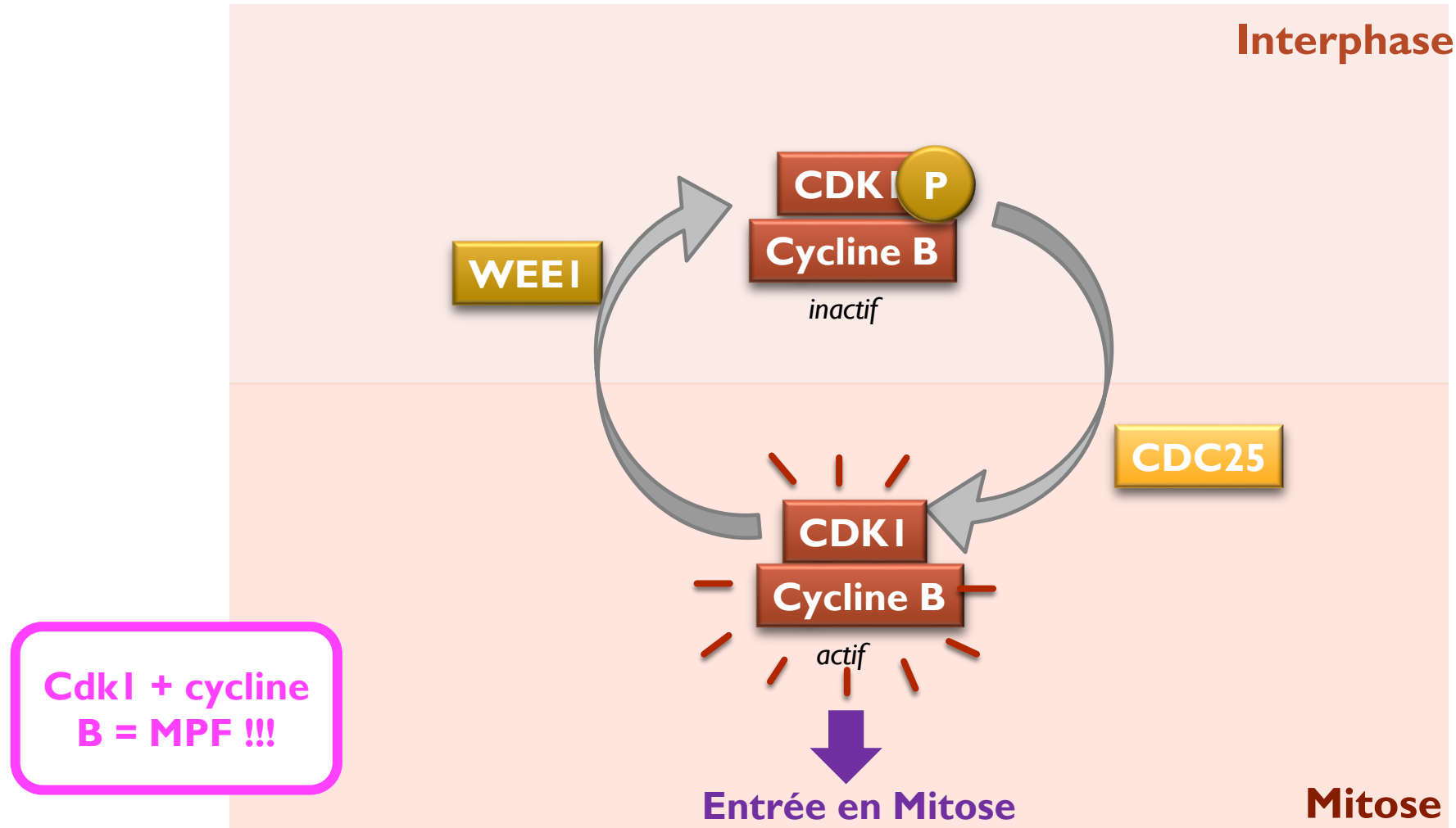
**Figure 9.23** Microtubules assemblés en éprouvette.  
Photomicrographie électronique de microtubules congelés, non fixés, qui ont polymérisé in vitro. Les protofilaments individuels et leurs sous-unités globulaires de tubuline sont visibles. Notez que le microtubule du milieu ne possède que 11 protofilaments. (Dû à l'obligeance de R.H. Wade, Institut de Biologie Structurale, Grenoble, France.)

## II. DE NOMBREUSES TRANSFORMATIONS CELLULAIRES EXPLOITENT DES TRANSFERTS DE PHOSPHORYLE : UTILISATION MAJEURE DE L'ATP

### A. RÉACTIONS DE TRANSFERTS DE PHOSPHORYLE

#### 2. La modification de l'activité enzymatique : activation ou inactivation

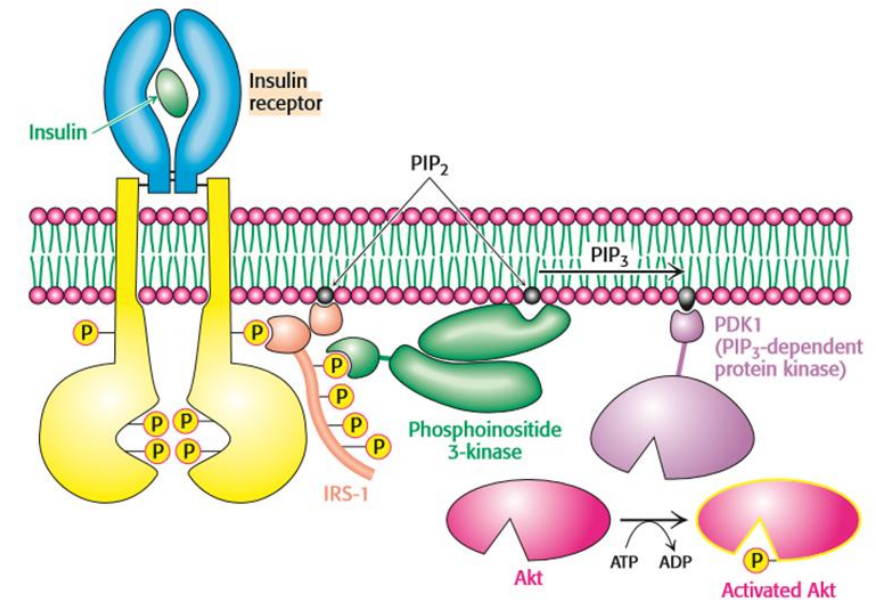
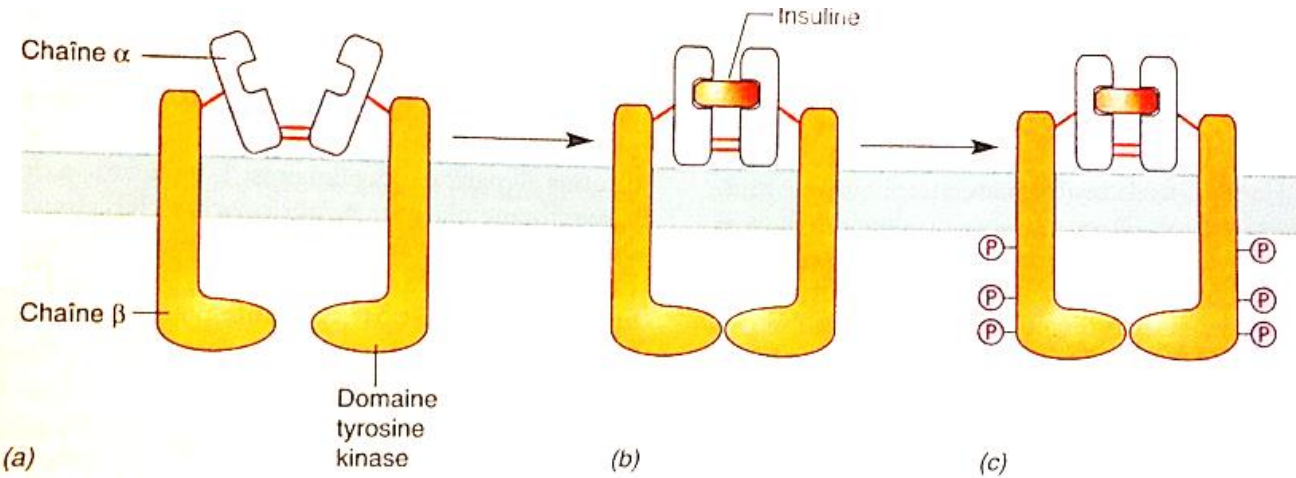
##### 2.1. Exemple de l'activation inactivation du MPF pour l'entrée en mitose



## II. DE NOMBREUSES TRANSFORMATIONS CELLULAIRES EXPLOITENT DES TRANSFERTS DE PHOSPHORYLE : UTILISATION MAJEURE DE L'ATP

### A. RÉACTIONS DE TRANSFERTS DE PHOSPHORYLE

#### 2.2. Exemple du récepteur à l'insuline à activité tyrosine kinase



**Figure 15.22 Réponse du récepteur d'insuline à la liaison du ligand.** (a) Le récepteur d'insuline, schématisé sous sa forme inactive, est un tétramère composé de deux sous-unités  $\alpha$  et deux  $\beta$ . (b) L'union d'une seule molécule d'insuline aux sous-unités  $\alpha$  entraîne un changement de conformation dans les sous-

unités  $\beta$  qui active leur activité tyrosine kinase. (c) Les sous-unités  $\beta$  activées phosphorylent les résidus tyrosine situés dans le domaine cytoplasmique du récepteur, ainsi que ceux de plusieurs substrats du récepteur d'insuline (IRS) décrits plus bas.

*Le transfert de groupements phosphoryle rend le récepteur à l'insuline actif (Karp p649)*

## II. DE NOMBREUSES TRANSFORMATIONS CELLULAIRES EXPLOITENT DES TRANSFERTS DE PHOSPHORYLE : UTILISATION MAJEURE DE L'ATP

### A. RÉACTIONS DE TRANSFERTS DE PHOSPHORYLE

## 2. La modification de l'activité enzymatique : activation ou inactivation

### Régulation de protéines par phosphorylation

- De nombreuses **protéines** sont régulées **post-traductionnellement** (après traduction) par des **phosphorylations**.
- Les (dé)phosphorylations permettent :
  - Un ajout de charges négatives
  - Un changement de **conformation**
  - Une **activation/inactivation** de la protéine
- Ces (dé)phosphorylations régulent de nombreuses fonctions...
  - La structure subcellulaire
    - ✓ Phosphorylation des lamines nucléaires lors de la mitose
  - Les voies de signalisation
    - ✓ Récepteur couplé à une enzyme (kinase)
    - ✓ MPF (maturation promoting factor) et cycle cellulaire
  - Les voies métaboliques via la régulation d'enzymes
    - ✓ Glycogène phosphorylase
  - L'expression du génome
    - ✓ Phosphorylation des histones ⇨ solénoïde (absence d'expression)

### PHOSPHORYLATION



#### Conséquences sur les protéines

charge (-)      (in)activation  
changement de conformation

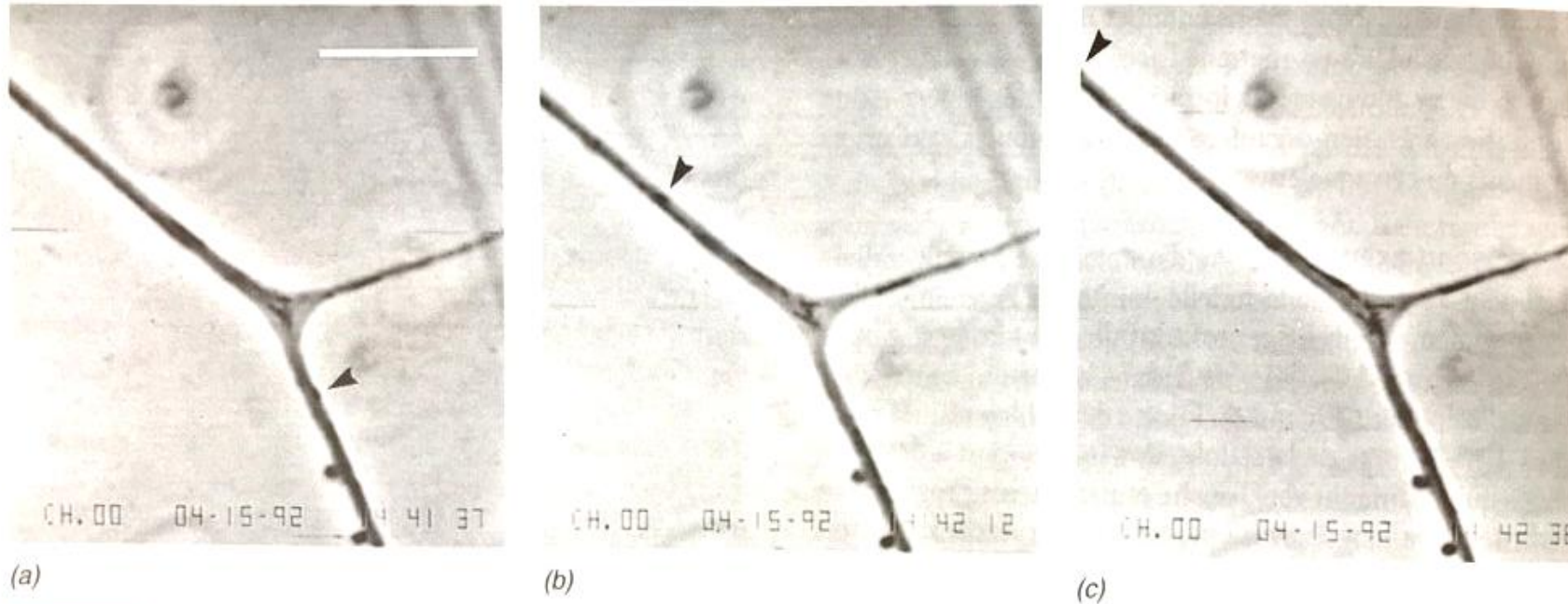


#### Fonctions cellulaires affectées

Structure      Signalisation  
Métabolisme

### 3. Les moteurs cellulaires

#### 3.1. Exemple de l'activité ATPasique de la dynéine et de la kinésine



**Figure 9.14** Mise en évidence du transport axonal. (a-c) Ces photomicrographies vidéo montrent la progression d'un organite membranaire le long d'un axone ramifié. Le corps de la cellule est loin du champ, au-dessus à gauche, alors que les extrémités (cônes de croissance, page 390) sont également en-dehors du champ, en dessous à droite. La position de l'organite est indiquée par les

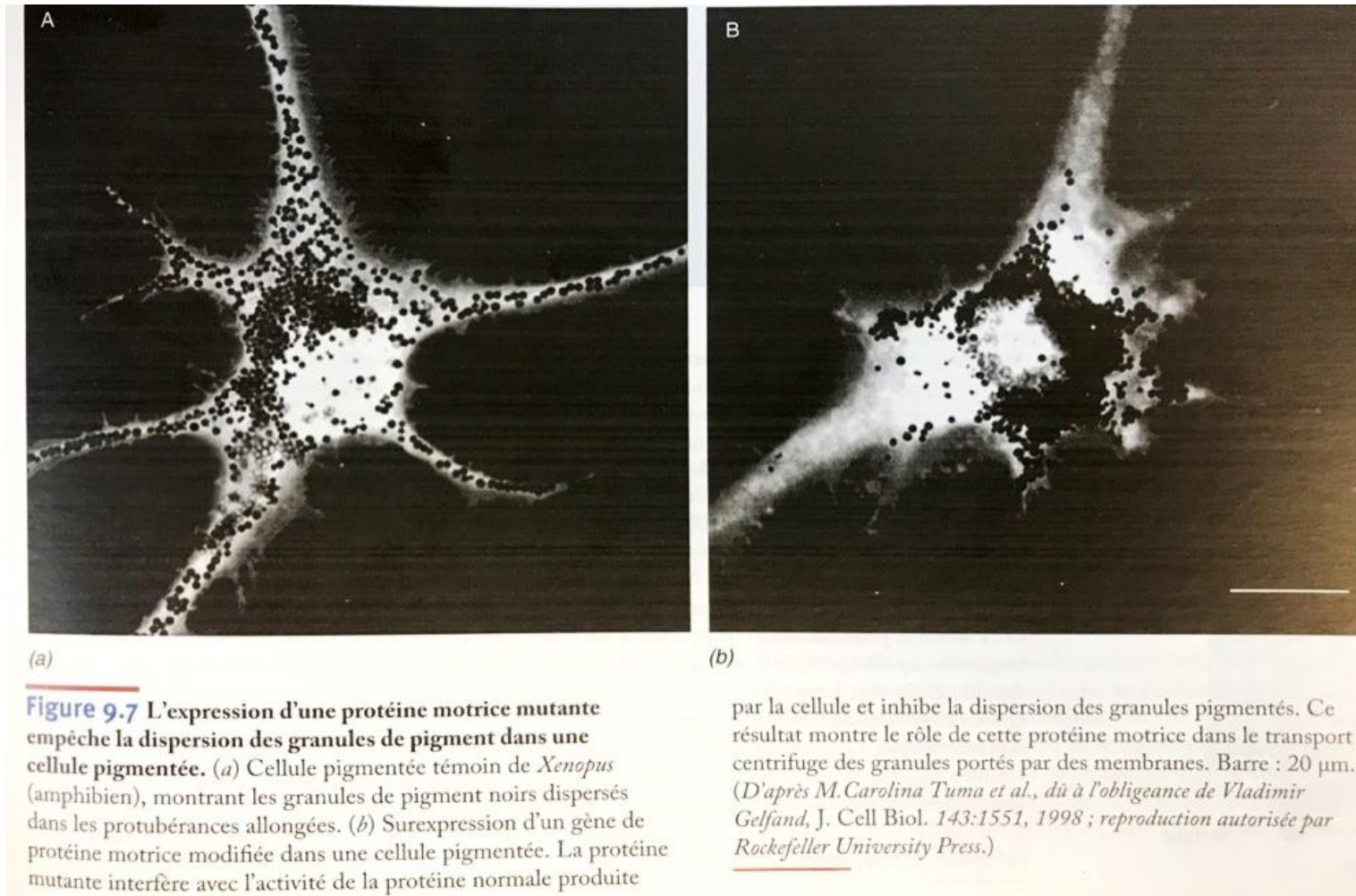
têtes de flèche. L'organite qui est suivi (un autophagosome) se déplace dans une direction centripète au point de ramification et continue à aller vers le corps de la cellule. Barre : 10  $\mu\text{m}$ . (D'après Peter J. Hollenbeck, *J. Cell. Biol.* 121:307, 1993, avec l'autorisation de reproduction de Rockefeller University Press.)

Estimez une vitesse de déplacement

*Document 1 : Mise en évidence d'un transport axonal orienté*

### 3. Les moteurs cellulaires

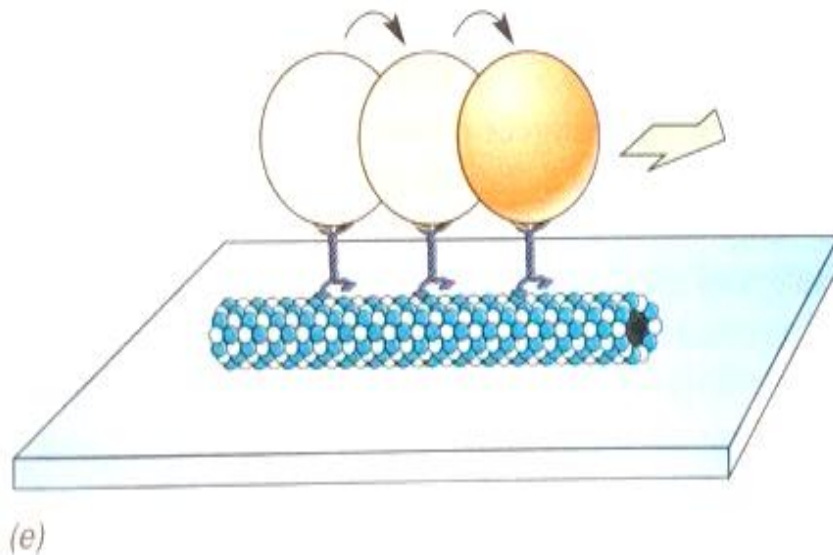
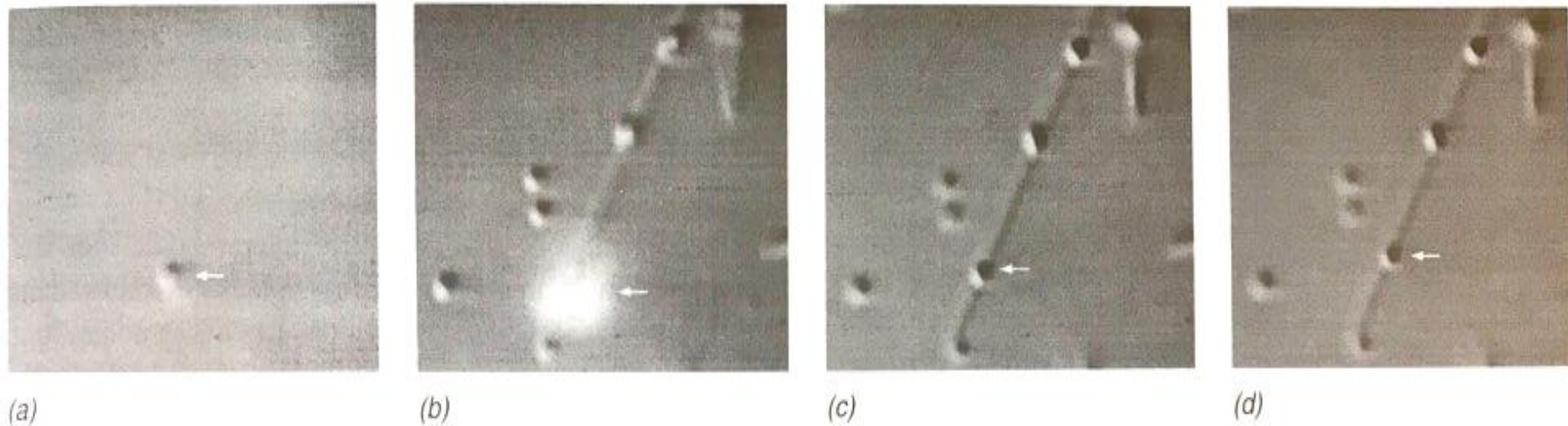
#### 3.1. Exemple de l'activité ATPasique de la dynéine et de la kinésine



Document 2 : utilisation de cellules surexprimant une protéine motrice mutante négative dominante, ie non fonctionnelle

### 3. Les moteurs cellulaires

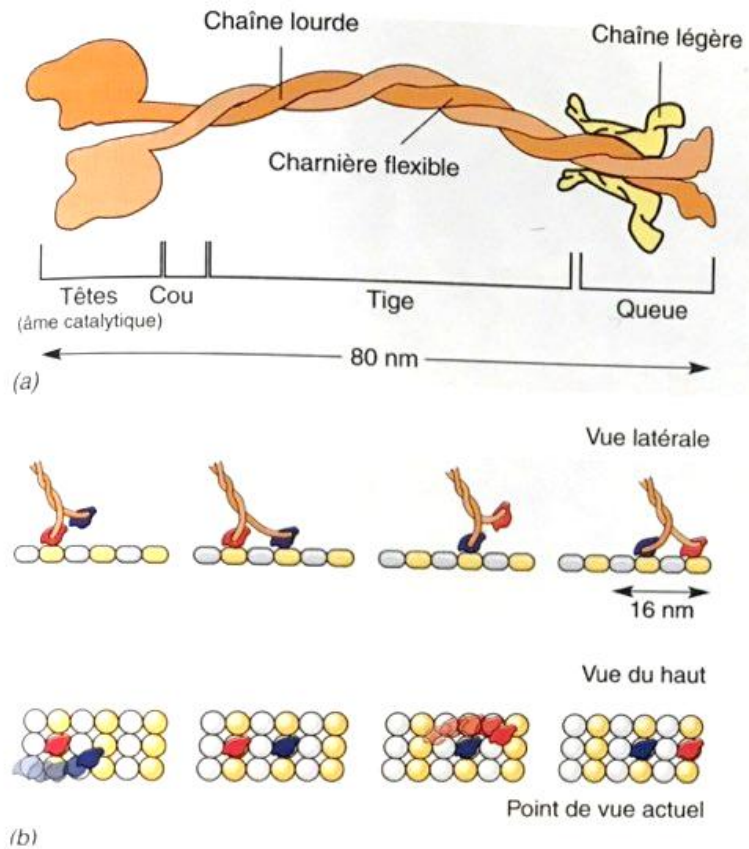
#### 3.1. Exemple de l'activité ATPasique de la dynéine et de la kinésine



**Figure 9.6** Utilisation de la microscopie vidéo pour suivre les activités de moteurs moléculaires. Dans cette séquence vidéo, (a) une bille tapissée d'une protéine motrice, la kinésine, est saisie par une pince optique laser dans une suspension ; (b) la bille est déposée sur un microtubule (l'image est en partie masquée par la réflexion de la lumière laser à l'interface couvre-objet-eau) ; (c-d) la bille se fixe au microtubule et commence à se déplacer le long du rail microtubulaire. (e) Schéma représentant le mouvement d'une bille le long d'un microtubule. (D'après Steven M. Block, L.S.B. Goldstein et Bruce J. Schnapp. Reproduit après autorisation à partir de Nature 348:349, 1990. Copyright 1990, Macmillan Magazines Ltd.)

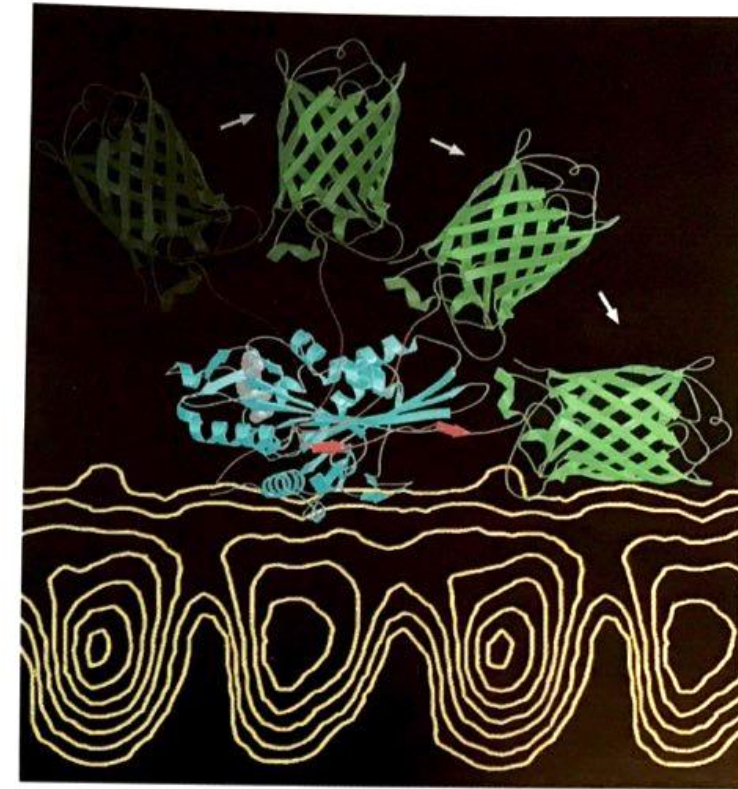
### 3. Les moteurs cellulaires

#### 3.1. Exemple de l'activité ATPasique de la dynéine et de la kinésine



(b)

**Figure 9.15 La kinésine.** (a) Structure d'une molécule de kinésine conventionnelle, essentiellement formée de deux chaînes lourdes qui s'enroulent l'une autour de l'autre pour former une seule tige commune et deux chaînes légères associées aux extrémités globulaires des chaînes lourdes. Les têtes génératrices de la force se fixent au microtubule et la queue à la cargaison qui doit être transportée. Avec une masse moléculaire d'environ 380 kDa, la kinésine est beaucoup plus petite que les autres protéines motrices, la myosine (myosine du muscle : 520 kDa) et la dynéine (plus de 1 000 kDa). (b) Schéma d'une molécule de kinésine se déplaçant le long d'un rail microtubulaire. Dans le modèle représenté ici, les deux têtes effectuent les mêmes mouvements, mais en alternance, un peu comme un individu qui se promène dans un jardin sur une rangée de pierres. Comme



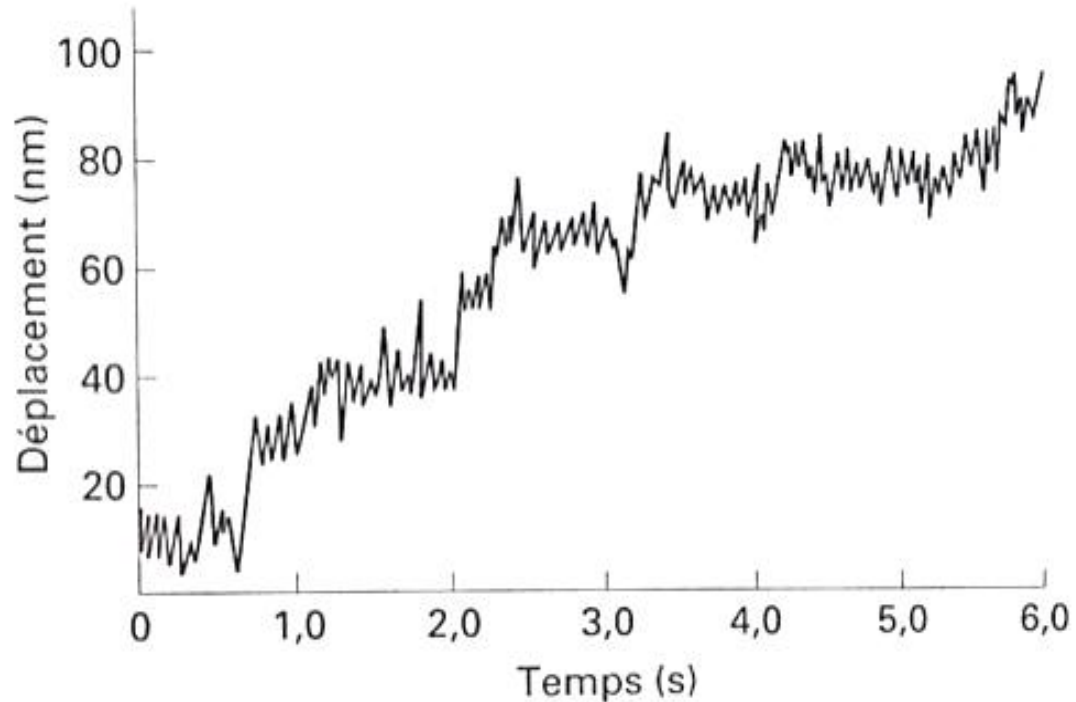
(c)

quand on marche, la tête (jambe) qui se trouve en arrière avance de 16 nm alternativement à gauche et à droite de la tige (le corps). (c) Changements de conformation dans les portions de tête (en bleu) et du cou (rouge) d'un monomère de kinésine conduisant la protéine le long d'un microtubule (courbes de niveau jaunes). Au lieu d'être relié à une seconde tête, le cou de cette molécule tronquée de kinésine est attaché à une molécule de GFP (en vert). Le mouvement de balancier du cou devrait normalement faire avancer l'autre tête et permettre au dimère de progresser vers l'extrémité plus du protofilament. (b : D'après C.L. Asbury, Curr. Opin. Cell Biol. 17:91, 2005 ; Copyright 2005, avec l'autorisation d'Elsevier Science ; c : d'après Ryan B. Case et al., dû à l'obligeance de Ronald D. Vale, Curr. Biol. Vol. 10, couverture du n° 3, 2000.)

Document 4 : rôle de l'hydrolyse de l'ATP dans la motricité de la kinésine

### 3. Les moteurs cellulaires

#### 3.1. Exemple de l'activité ATPasique de la dynéine et de la kinésine



**Figure 15-44**

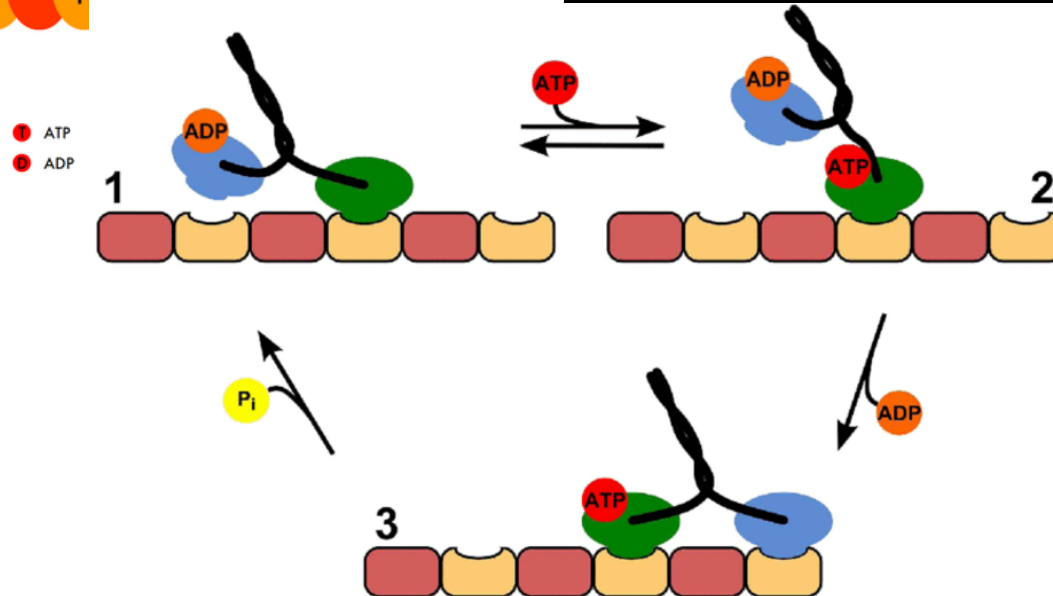
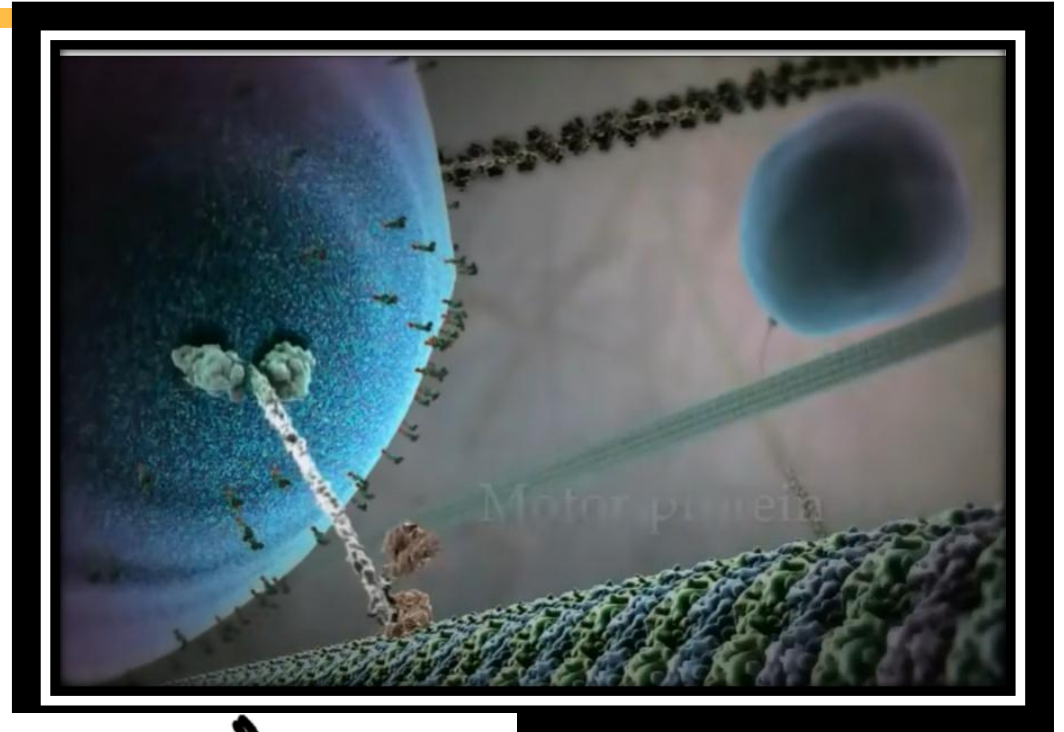
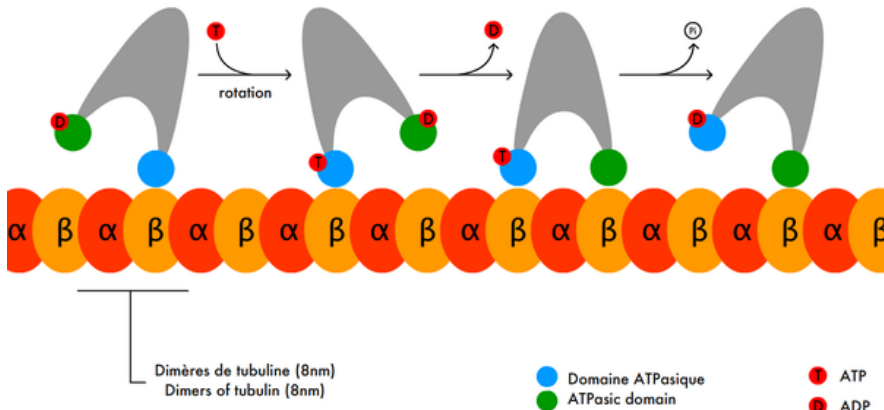
Observation directe du mouvement d'une bille portée par un seul moteur de kinésine sur un guide microtubulaire. De multiples pas ont été franchis dans cet intervalle de six secondes. La taille moyenne d'un pas est d'environ 80 Å. [D'après K. Svoboda, C.F. Schmidt, B.J. Schnapp et S.M. Block. *Nature* 365(1993):721.]

*Document 5 : observation directe du mouvement d'une bille portée par un seul moteur de kinésine*

### 3. Les moteurs cellulaires

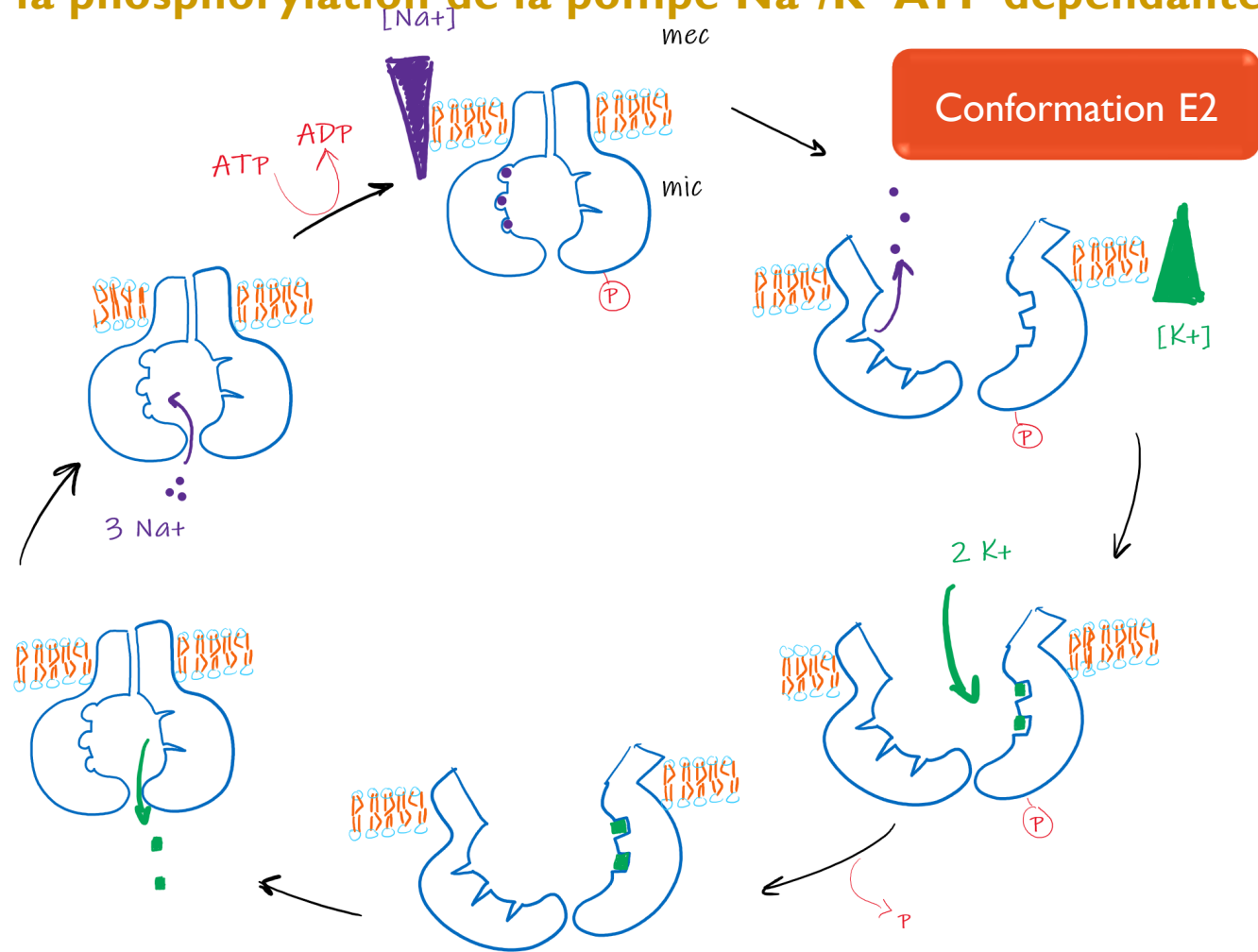
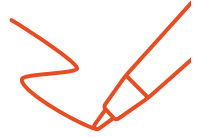
#### 3.1. Exemple de l'activité ATPasique de la dynéine et de la kinésine

Déplacement d'une kinésine  
Motility of kinesin



### 3. Les moteurs cellulaires

#### 3.2. Exemple de la phosphorylation de la pompe $\text{Na}^+/\text{K}^+$ ATP dépendante



- 1- Fixation de 3  $\text{Na}^+$  sur E1
- 2- Phosphorylation de E1 => changement de conformation E1 -> E2 libération vers le mec de 3  $\text{Na}^+$  et
- 3- fixation de 2  $\text{K}^+$  sur E2
- 4- Déphosphorylation de E2 => changement de conformation E2 -> E1 entrée de 2  $\text{K}^+$
- 1 fixation de 3  $\text{Na}^+$  sur E1

Modèle du cycle de pompage de la pompe  $\text{Na}^+/\text{K}^+$  ATP dépendante

Cycle de fonctionnement de la pompe  $\text{Na}^+/\text{K}^+$  - ATP dépendante (S. Dalaine)

# SV-E-1 L'approvisionnement en matière organique Introduction : les formes d'énergie dans une cellule

## SV-E-I-A Les formes d'énergie dans la cellule

### I. Les besoins énergétiques cellulaires et leur couverture par des sources énergétiques diversifiées

- A. L'organisation fonctionnelle de l'état cellulaire est indissociable d'un flux énergétique
- B. Les principes thermodynamiques

### II. Les formes d'énergie dans la cellule

- A. Les énergies de réaction
- B. Les énergies de gradients
- C. Les énergies d'oxydo-réduction
- D. L'énergie mécanique

### III. Les couplages énergétiques

- A. Couplage chimio-osmotiques
- B. Couplage osmo-chimique
- C. Couplage osmo-osmotique
- D. Couplage chimio-chimique
- E. L'énergie de réaction permet de faire tourner un cycle

## SV-E-I-B Approvisionnement et devenir des molécules

### I. L'approvisionnement et le devenir des molécules organiques ou minérales dans les cellules

- A. La MO est nécessaire au métabolisme de la cellule
- B. Les cellules hétérotrophes prélèvent la MO
- C. Les cellules autotrophes réduisent la MN prélevée en MO

### II. La photosynthèse assure la réduction des MN en convertissant l'énergie lumineuse

- A. La photosynthèse : une réduction du C minéral
- B. Le cycle de Calvin
- C. La chaîne photosynthétique
- D. La chimiosynthèse: cas de Nitrobacter

## SV-E-IC Pièce centrale des voies du métabolisme énergétique : l'ATP, un coenzyme nucléotidique de transfert de phosphoryle

### I. L'énergie d'hydrolyse d'un coenzyme nucléotidique, l'ATP

- A. Les liaisons phosphoanhydrides
- B.  $\Delta rG^{o'}$  et  $\Delta rG'$  d'hydrolyse de l'ATP
- C. La position intermédiaire du potentiel d'hydrolyse de l'ATP

### II. De nombreuses transformations cellulaires exploitent des transferts de phosphoryle : utilisation majeure de l'ATP

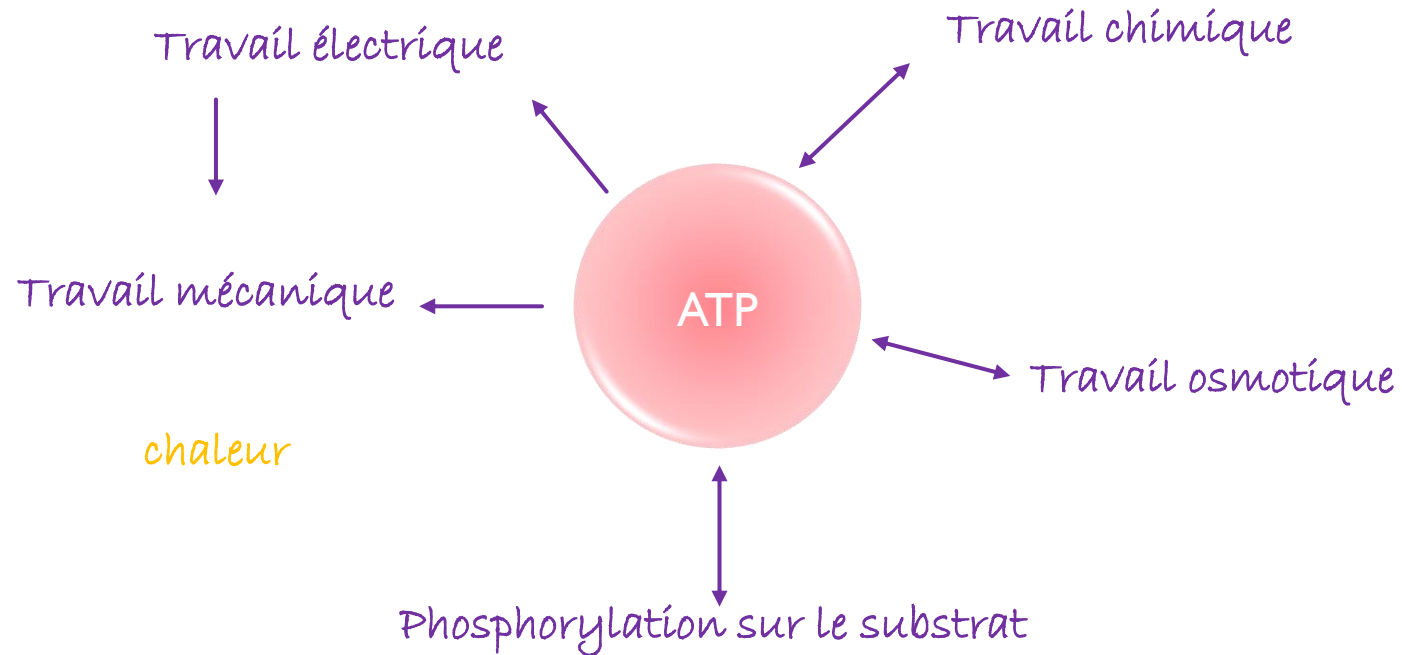
- A. Des réactions de transfert de phosphoryle
- B. Le bilan sur les transferts de phosphoryle

### III. Les couplages permettant la synthèse d'ATP

- A. La formation d'ATP par transphosphorylation
- B. La formation d'ATP par conversion d'une force protomotrice

## II. DE NOMBREUSES TRANSFORMATIONS CELLULAIRES EXPLOITENT DES TRANSFERTS DE PHOSPHORYLE : UTILISATION MAJEURE DE L'ATP

### B. LE BILAN SUR LES TRANSFERTS DE PHOSPHORYLE



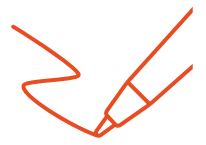
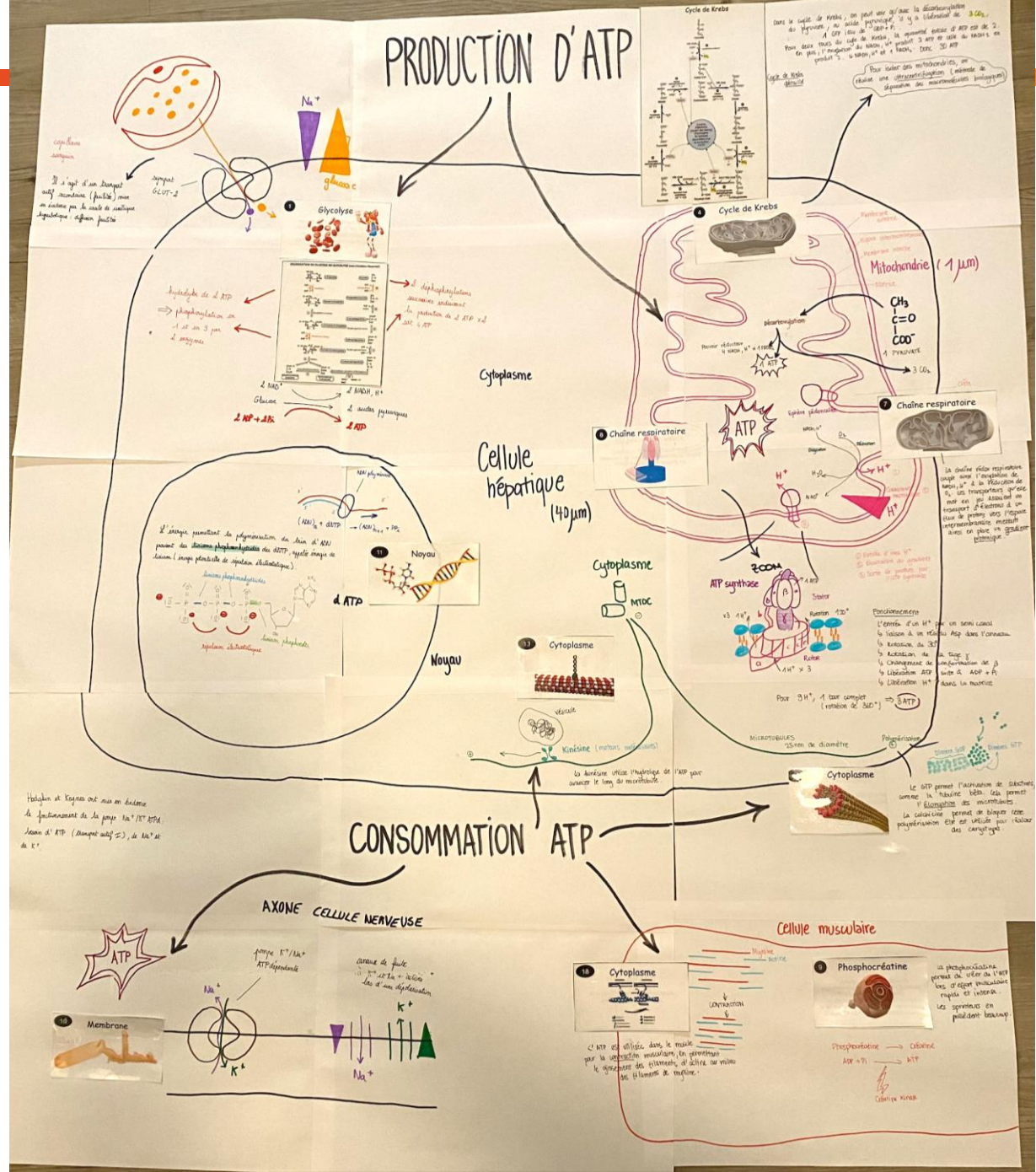
*Rôle prépondérant de la molécule d'ATP dans la réalisation des travaux cellulaires*



Processus cellulaires	Exemples où l'ATP intervient	Type de couplage
Activation de précurseurs	Phosphorylation du glucose en G6P au début de la glycolyse.	Chimio-chimique
Régénération de molécules	Phosphorylation du GDP en GTP.	Chimio-chimique
Biosynthèse de molécules	Synthèse de la glutamine à partir de glutamate et de $\text{NH}_4^+$ .	Chimio-chimique
Biosynthèse de macromolécules	Formation de l'ADP-glucose (monomère polymérisable en amidon).	Chimio-chimique
Echange de matière	Transport de solutés contre le gradient de concentration via des pompes membranaires ou transports actifs primaires ( $\text{Na}^+/\text{K}^+\text{ATPase}$ , $\text{H}^+\text{ATPase}$ , $\text{Ca}^{2+}\text{ATPase}$ ).	Chimio-osmotique
Contraction	Armement et coup de force de la tête de myosine sur l'actine lors de la contraction musculaire.	Chimio-mécanique
Déplacement	Trans-conformation de la dynéine et de la kinésine qui se déplacent sur les microtubules	Chimio-mécanique

*L'ATP est utilisée dans de nombreuses transformations cellulaires*

# PRODUCTION D'ATP









# SV-E-1 L'approvisionnement en matière organique Introduction : les formes d'énergie dans une cellule

## SV-E-I-A Les formes d'énergie dans la cellule

### I. Les besoins énergétiques cellulaires et leur couverture par des sources énergétiques diversifiées

- A. L'organisation fonctionnelle de l'état cellulaire est indissociable d'un flux énergétique
- B. Les principes thermodynamiques

### II. Les formes d'énergie dans la cellule

- A. Les énergies de réaction
- B. Les énergies de gradients
- C. Les énergies d'oxydo-réduction
- D. L'énergie mécanique

### III. Les couplages énergétiques

- A. Couplage chimio-osmotiques
- B. Couplage osmo-chimique
- C. Couplage osmo-osmotique
- D. Couplage chimio-chimique
- E. L'énergie de réaction permet de faire tourner un cycle

## SV-E-I-B Approvisionnement et devenir des molécules

### I. L'approvisionnement et le devenir des molécules organiques ou minérales dans les cellules

- A. La MO est nécessaire au métabolisme de la cellule
- B. Les cellules hétérotrophes prélèvent la MO
- C. Les cellules autotrophes réduisent la MN prélevée en MO

### II. La photosynthèse assure la réduction des MN en convertissant l'énergie lumineuse

- A. La photosynthèse : une réduction du C minéral
- B. Le cycle de Calvin
- C. La chaîne photosynthétique
- D. La chimiosynthèse: cas de Nitrobacter

## SV-E-IC Pièce centrale des voies du métabolisme énergétique : l'ATP, un coenzyme nucléotidique de transfert de phosphoryle

### I. L'énergie d'hydrolyse d'un coenzyme nucléotidique, l'ATP

- A. Les liaisons phosphoanhydrides
- B.  $\Delta rG^{\circ}$  et  $\Delta rG'$  d'hydrolyse de l'ATP
- C. La position intermédiaire du potentiel d'hydrolyse de l'ATP

### II. De nombreuses transformations cellulaires exploitent des transferts de phosphoryle : utilisation majeure de l'ATP

- A. Des réactions de transfert de phosphoryle
- B. Le bilan sur les transferts de phosphoryle

### III. Les couplages permettant la synthèse d'ATP

- A. La formation d'ATP par transphosphorylation
- B. La formation d'ATP par conversion d'une force protomotrice

### III. LES COUPLAGES PERMETTENT LA FORMATION D'ATP

#### A. LA FORMATION D'ATP PAR TRANSPHOSPHORYLATION OU PHOSPHORYLATION DU SUBSTRAT : COUPLAGE CHIMIO-CHIMIQUE

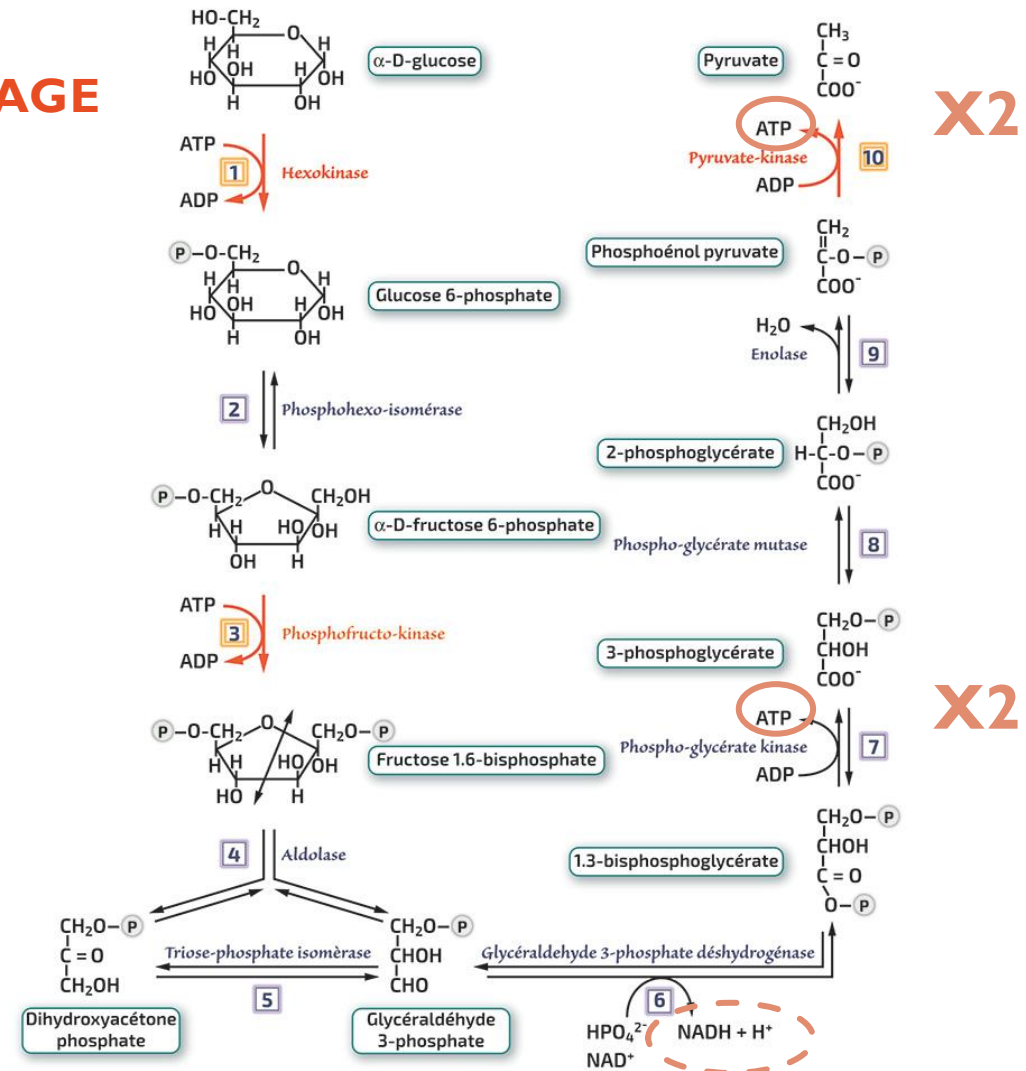
##### 1. Dans la glycolyse

### SYNTHÈSE D'ATP PAR PHOSPHORYLATION SUR SUBSTRAT

#### Rappel

composés	$\Delta_r G^0$ en $\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$
PEP (phosphoénolpyruvate)	-61,9
1,3 -Bisphosphoglycérate	-49,4

### GLYCOLYSE



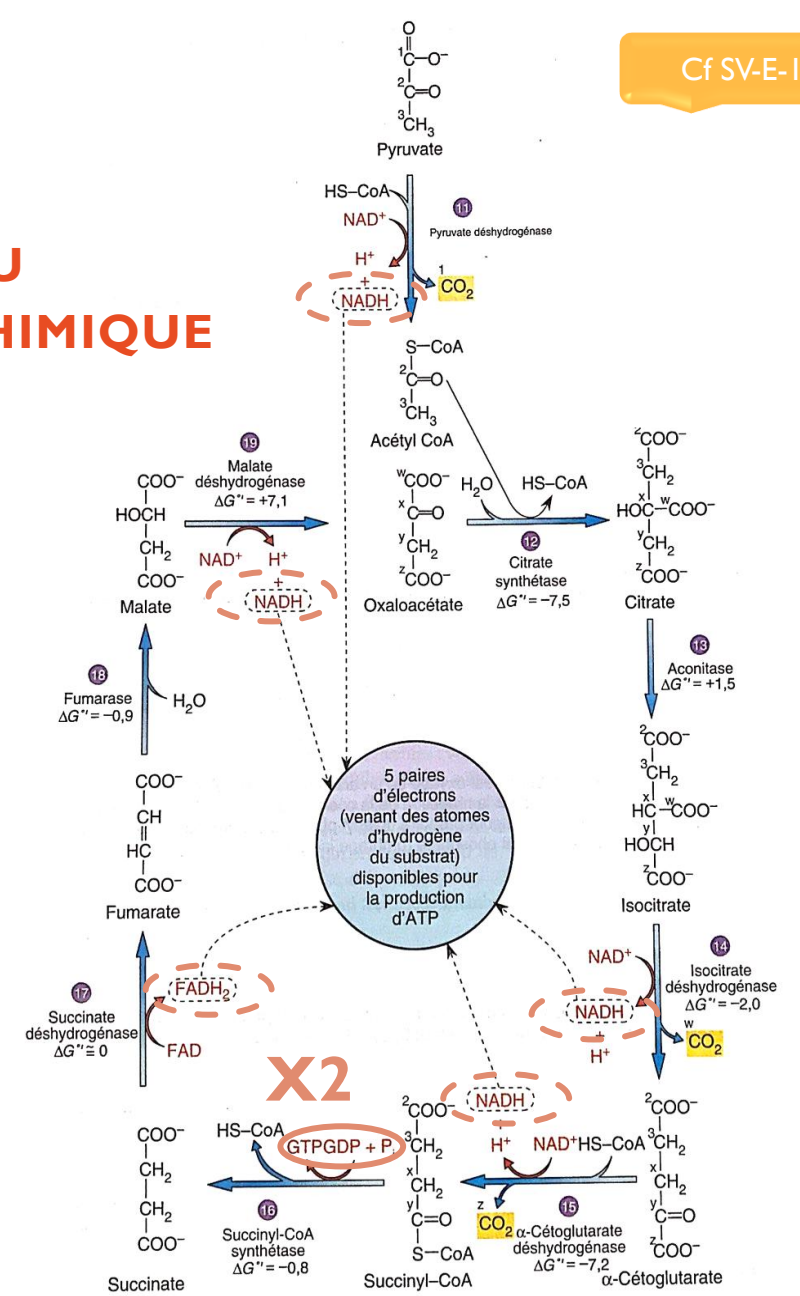
### III. LES COUPLAGES PERMETTENT LA FORMATION D'ATP

#### A. LA FORMATION D'ATP PAR TRANSPHOSPHORYLATION OU PHOSPHORYLATION DU SUBSTRAT : COUPLAGE CHIMIO-CHIMIQUE

##### 2. Dans le cycle de Krebs

SYNTHÈSE DE DEUX « ATP » (GTP)  
PAR PHOSPHORYLATION SUR  
SUBSTRAT

GTP transfère son groupe  
phosphoryle via une nucléoside  
diphosphate kinase :  
 $GTP + ADP \rightarrow ATP + GDP$



### III. LES COUPLAGES PERMETTENT LA FORMATION D'ATP

#### A. LA FORMATION D'ATP PAR TRANSPHOSPHORYLATION OU PHOSPHORYLATION DU SUBSTRAT : COUPLAGE CHIMIO-CHIMIQUE

#### 3. Dans le cytosol des cellules musculaires, la phosphocréatine

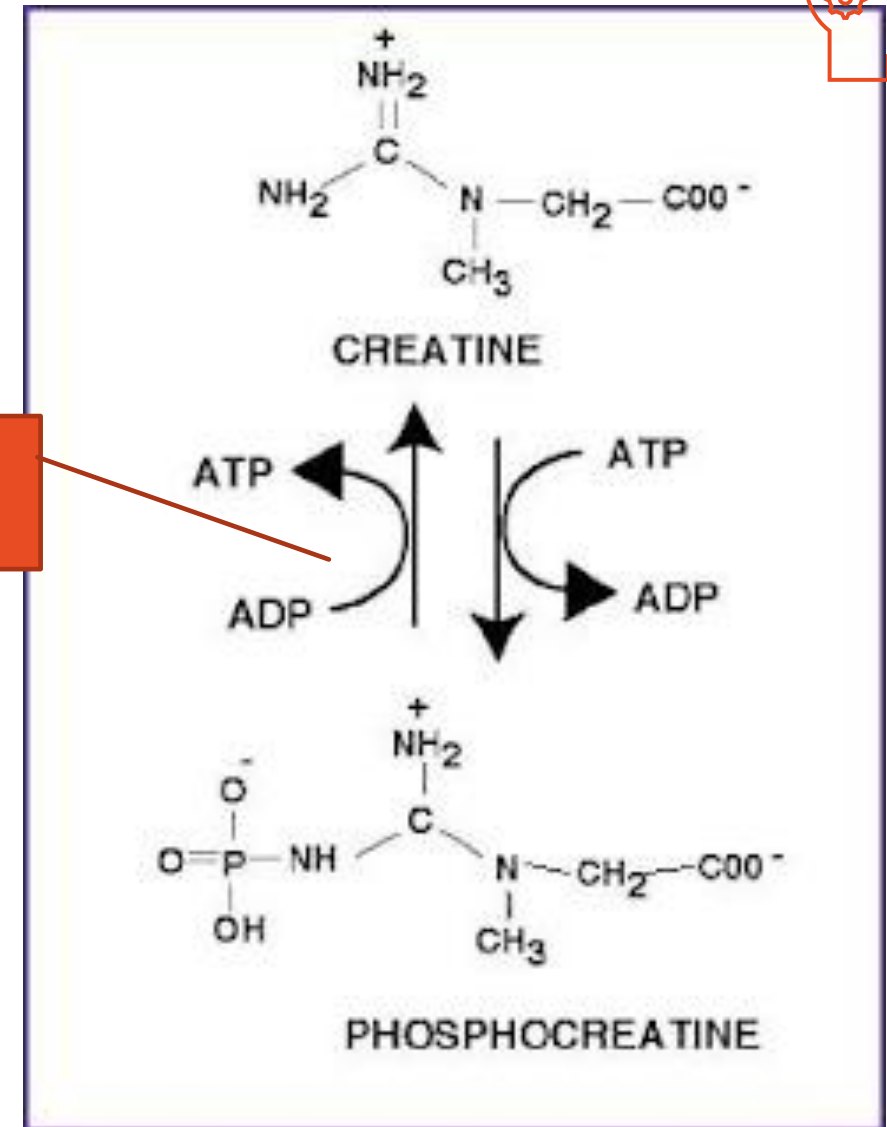
SYNTHÈSE D'ATP PAR **PHOSPHORYLATION SUR SUBSTRAT** dans les cellules musculaires

la **phosphocréatine** possède un haut potentiel de transfert de groupe phosphoryle, la créatine kinase catalyse la réaction.

La phosphocréatine est un réservoir d'énergie.

$$\Delta G^{\circ} = -43,1 + 30,5 = -12,6 \text{ kJ.mol}^{-1}$$

Créatine kinase



# SV-E-1 L'approvisionnement en matière organique Introduction : les formes d'énergie dans une cellule

## SV-E-I-A Les formes d'énergie dans la cellule

### I. Les besoins énergétiques cellulaires et leur couverture par des sources énergétiques diversifiées

- A. L'organisation fonctionnelle de l'état cellulaire est indissociable d'un flux énergétique
- B. Les principes thermodynamiques

### II. Les formes d'énergie dans la cellule

- A. Les énergies de réaction
- B. Les énergies de gradients
- C. Les énergies d'oxydo-réduction
- D. L'énergie mécanique

### III. Les couplages énergétiques

- A. Couplage chimio-osmotiques
- B. Couplage osmo-chimique
- C. Couplage osmo-osmotique
- D. Couplage chimio-chimique
- E. L'énergie de réaction permet de faire tourner un cycle

## SV-E-I-B Approvisionnement et devenir des molécules

### I. L'approvisionnement et le devenir des molécules organiques ou minérales dans les cellules

- A. La MO est nécessaire au métabolisme de la cellule
- B. Les cellules hétérotrophes prélèvent la MO
- C. Les cellules autotrophes réduisent la MN prélevée en MO

### II. La photosynthèse assure la réduction des MN en convertissant l'énergie lumineuse

- A. La photosynthèse : une réduction du C minéral
- B. Le cycle de Calvin
- C. La chaîne photosynthétique
- D. La chimiosynthèse: cas de Nitrobacter

## SV-E-IC Pièce centrale des voies du métabolisme énergétique : l'ATP, un coenzyme nucléotidique de transfert de phosphoryle

### I. L'énergie d'hydrolyse d'un coenzyme nucléotidique, l'ATP

- A. Les liaisons phosphoanhydrides
- B.  $\Delta rG^{\circ}$  et  $\Delta rG'$  d'hydrolyse de l'ATP
- C. La position intermédiaire du potentiel d'hydrolyse de l'ATP

### II. De nombreuses transformations cellulaires exploitent des transferts de phosphoryle : utilisation majeure de l'ATP

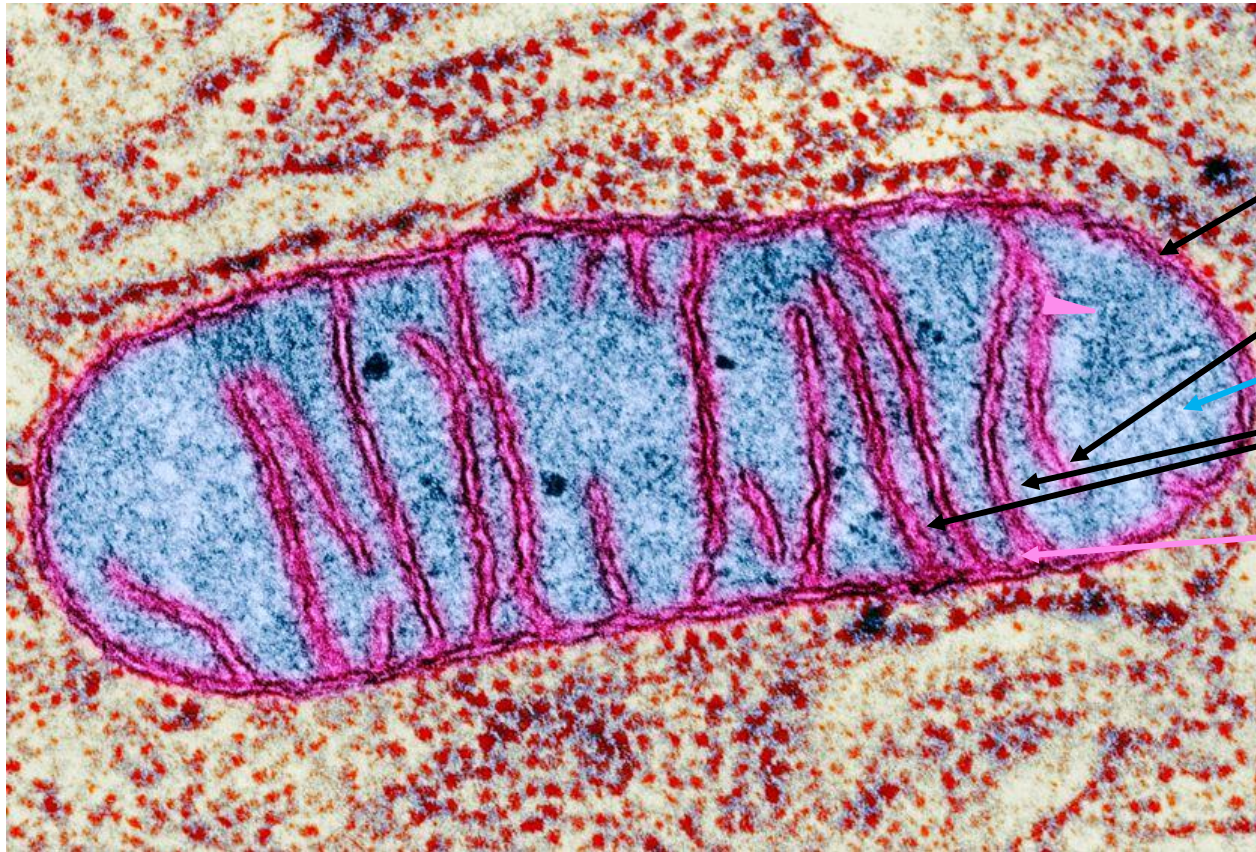
- A. Des réactions de transfert de phosphoryle
- B. Le bilan sur les transferts de phosphoryle

### III. Les couplages permettant la synthèse d'ATP

- A. La formation d'ATP par transphosphorylation
- B. La formation d'ATP par conversion d'une force protomotrice

## B. LA FORMATION D'ATP PAR CONVERSION D'UNE FORCE PROTOMOTRICE : COUPLAGE OSMO-CHIMIQUE, RÔLE DES ATP-SYNTHÉTASES

### I. Rappels sur l'ultrastructure des mitochondries



*Electronographie colorisée d'une mitochondrie*

membrane externe

membrane interne

matrice

crêtes

espace intermembranaire

Légènder: membrane externe, membrane interne, crête, matrice, espace intermembranaire

Titre, échelle,

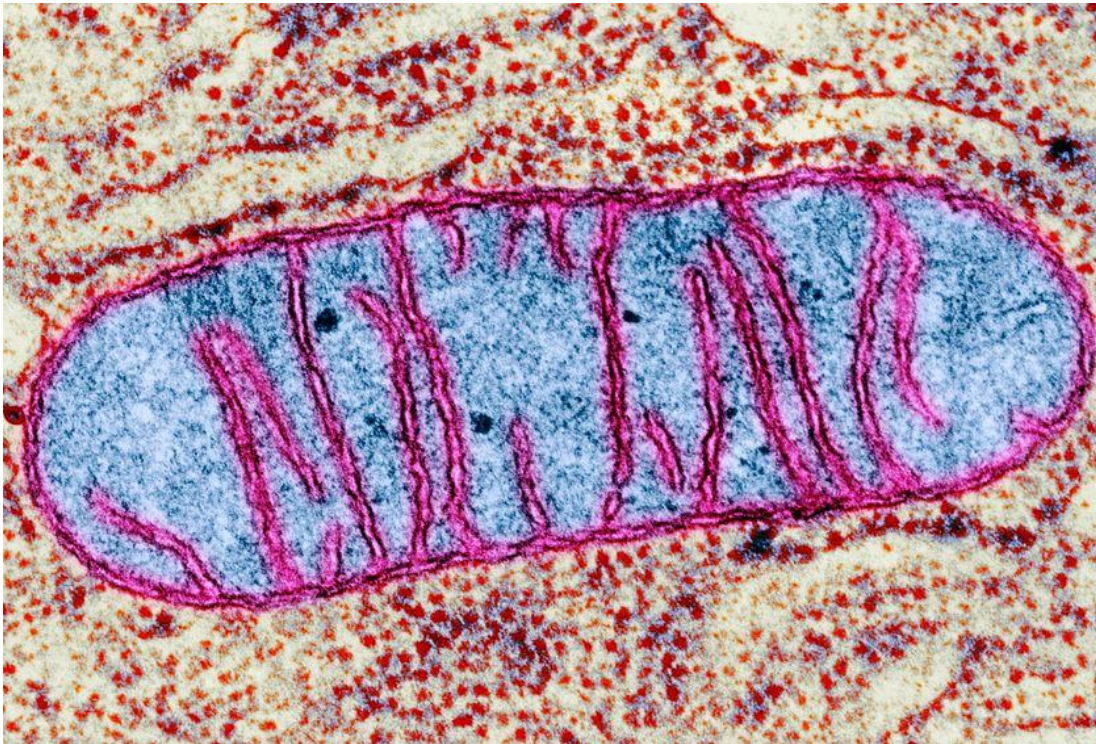
Schématiser les gradients de concentration d'ions  $H^+$  entre les deux compartiments

Rappeler l'origine de ce gradient d'ions  $H^+$ .

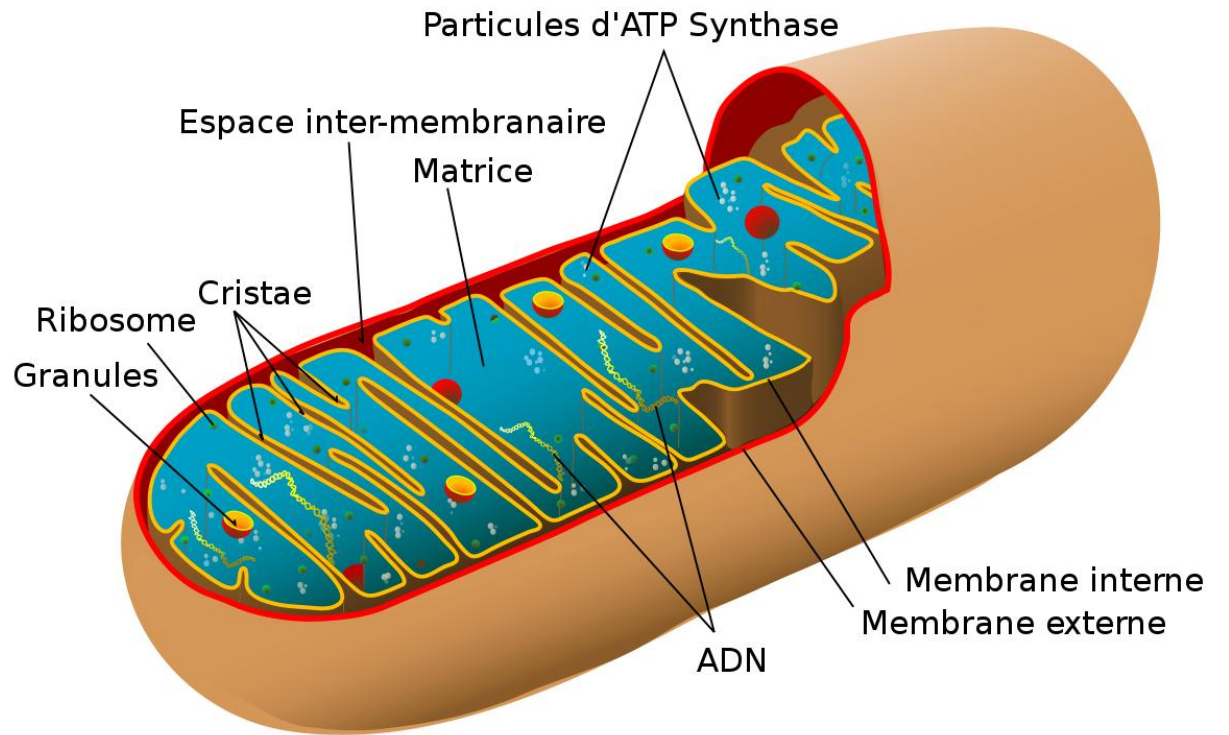
## B. LA FORMATION D'ATP PAR CONVERSION D'UNE FORCE PROTOMOTRICE : COUPLAGE OSMO-CHIMIQUE, RÔLE DES ATP-SYNTHÉTASES

### I. Rappels sur l'ultrastructure des mitochondries

#### Structure de la mitochondrie



*Electronographie colorisée d'une mitochondrie (MET)*



*Schéma 3D de l'organisation d'une mitochondrie*

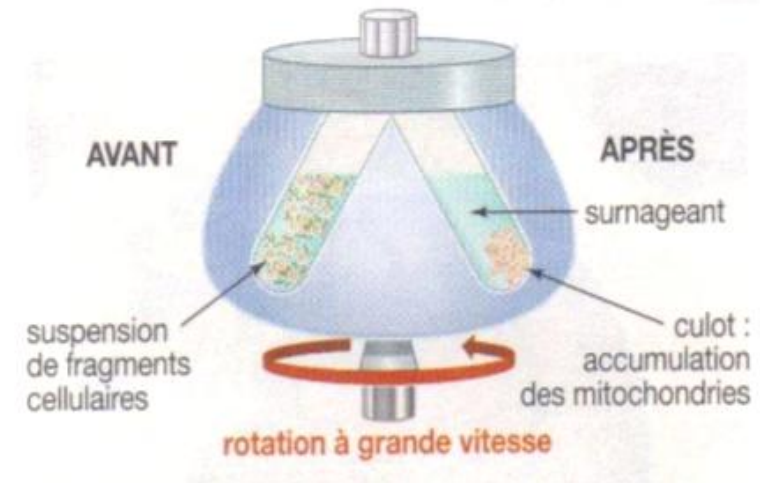
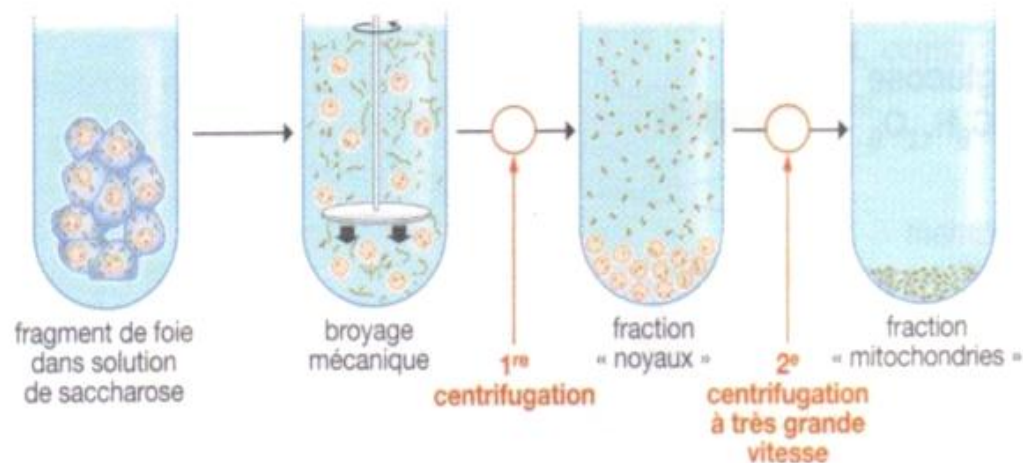
## B. LA FORMATION D'ATP PAR CONVERSION D'UNE FORCE PROTOMOTRICE : COUPLAGE OSMO-CHIMIQUE, RÔLE DES ATP-SYNTHÉTASES

### 2. Mise en évidence expérimentale du rôle des mitochondries dans la respiration cellulaire

Cf Tale

Pour étudier le rôle des mitochondries, il est nécessaire de les isoler. Pour cela, on utilise des cellules particulièrement riches en mitochondries, par exemple des cellules du foie.

Les cellules subissent d'abord un broyage mécanique modéré afin de libérer les constituants sans trop les léser. Le broyat est ensuite centrifugé : la rotation à grande vitesse des tubes contenant les extraits cellulaires permet de séparer les constituants cellulaires et d'obtenir une fraction riche en mitochondries. L'isolement réel des mitochondries nécessite cependant une centrifugation à très grande vitesse (imparfaitement réalisée avec une centrifugeuse de lycée).



## 2. Mise en évidence expérimentale du rôle des mitochondries dans la respiration cellulaire

Cf Tale

### ■ UNE HYPOTHÈSE À ÉPROUVER

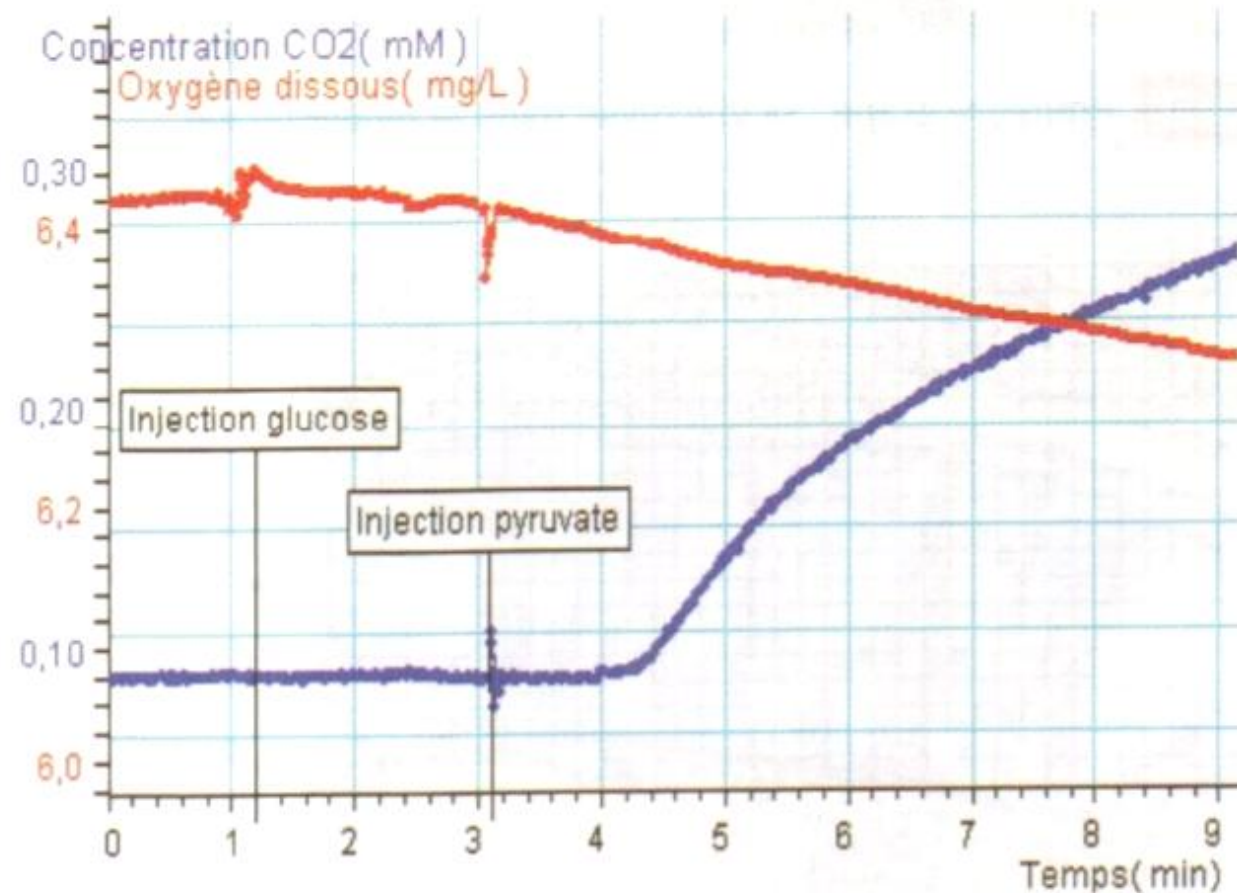
Différentes études et observations suggèrent que la respiration se déroule dans les mitochondries mais qu'une première étape se produit dans le cytoplasme, en dehors des mitochondries.

Cette première étape consisterait en une scission (et une déshydrogénation) du glucose ( $C_6H_{12}O_6$ ) en deux molécules d'acide pyruvique ( $C_3H_4O_3$ ).

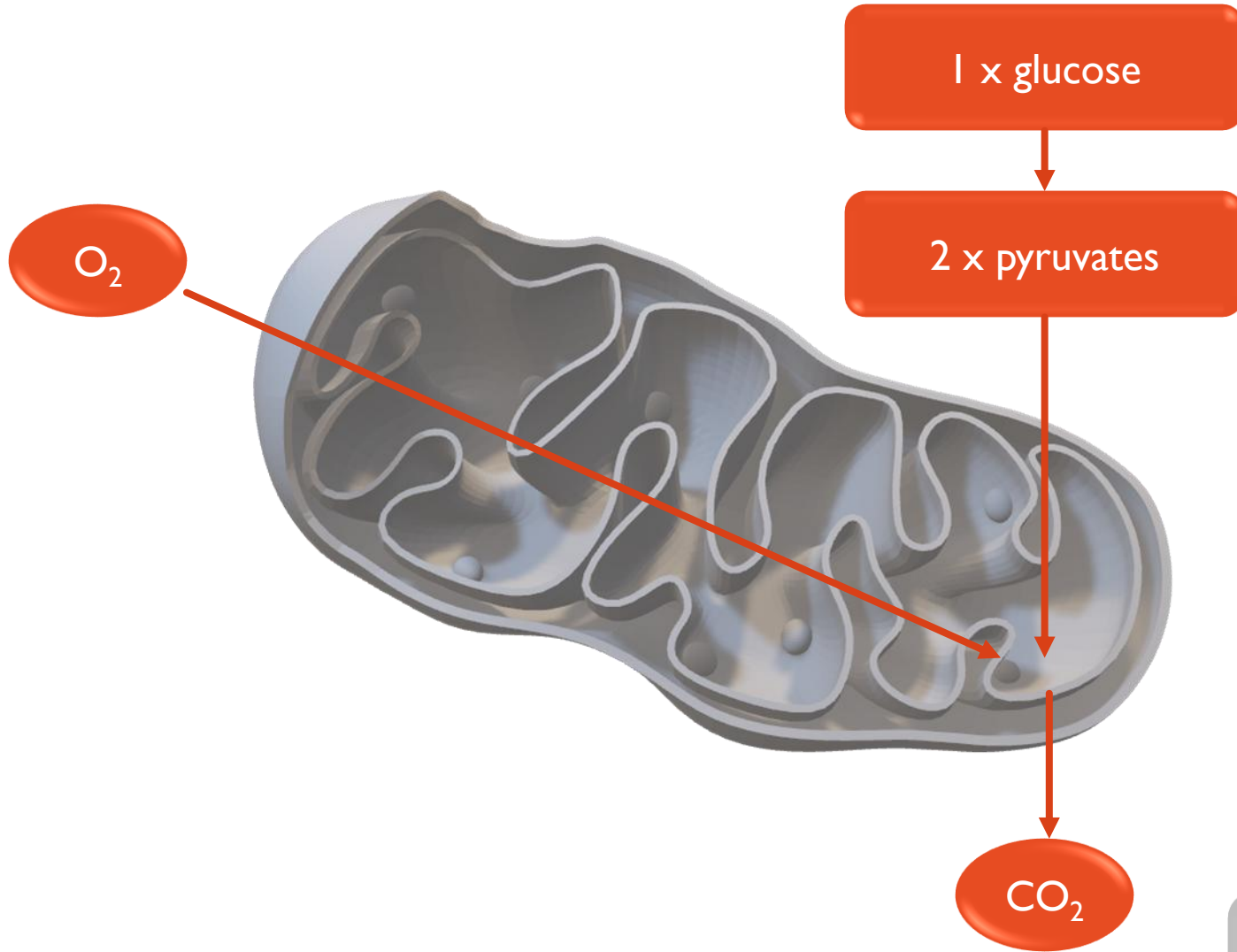
Pour éprouver cette hypothèse, on prépare un extrait contenant des mitochondries isolées et on mesure les concentrations en dioxygène et en dioxyde de carbone de cette suspension.

**Remarque :** Le pyruvate est la forme ionique de l'acide pyruvique.

### ■ RÉSULTAT



*Approche expérimentale du rôle des mitochondries dans la respiration cellulaire*



Et de l'énergie sous  
forme d'ATP et de  
l'eau...



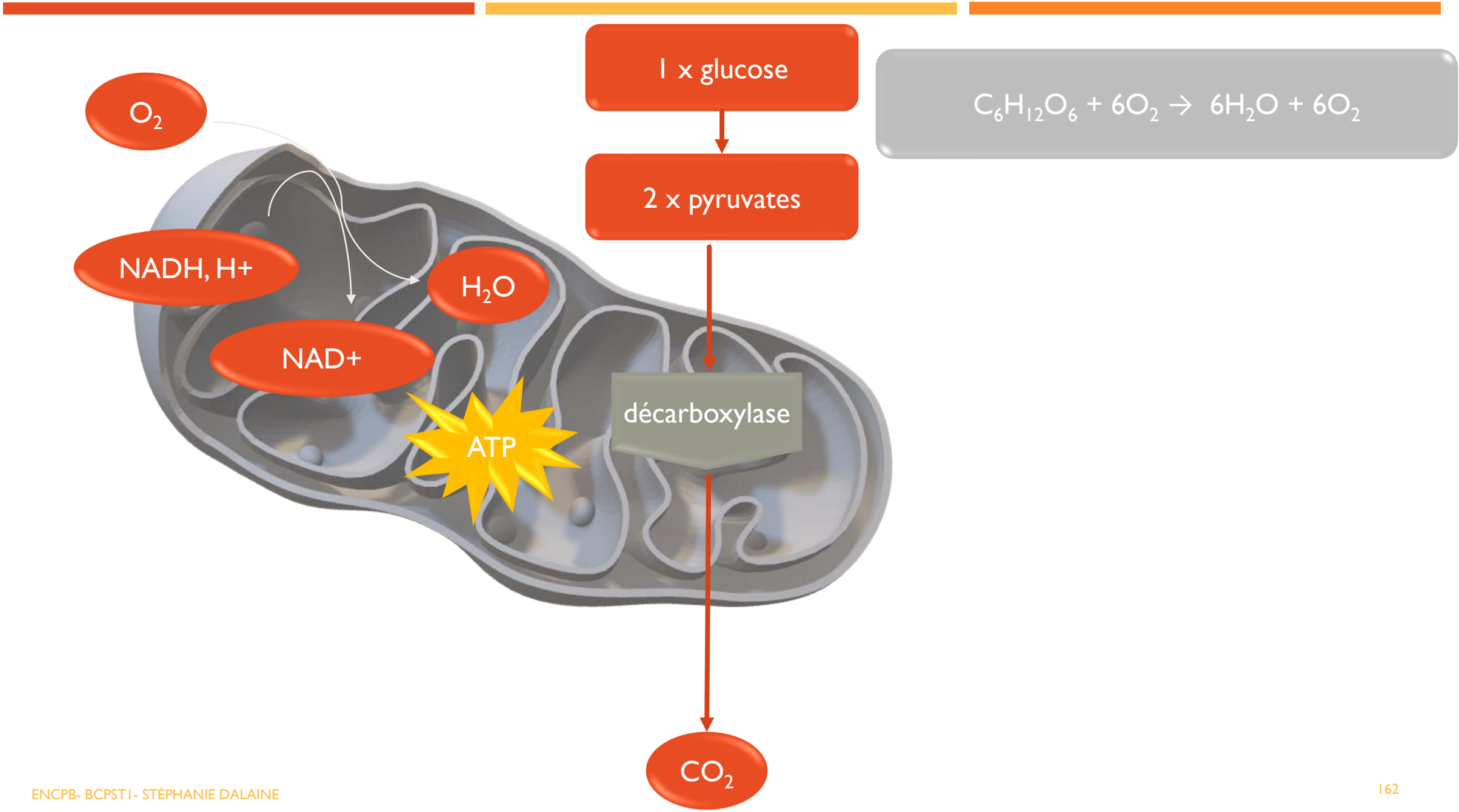
## B. LA FORMATION D'ATP PAR CONVERSION D'UNE FORCE PROTOMOTRICE : COUPLAGE OSMO-CHIMIQUE, RÔLE DES ATP-SYNTHÉTASES

### 2.2. Expériences sur des fractions mitochondriales

Des mitochondries sont fragmentées par l'action d'ultrasons. On obtient différentes fractions.

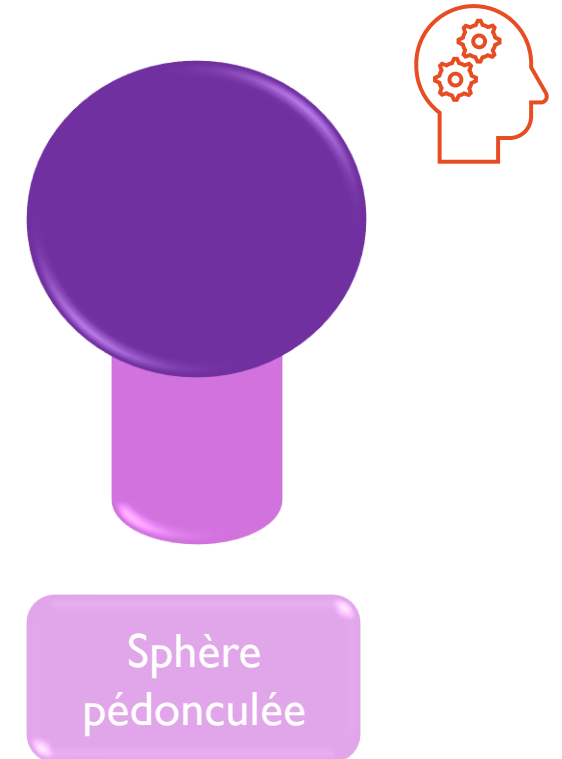
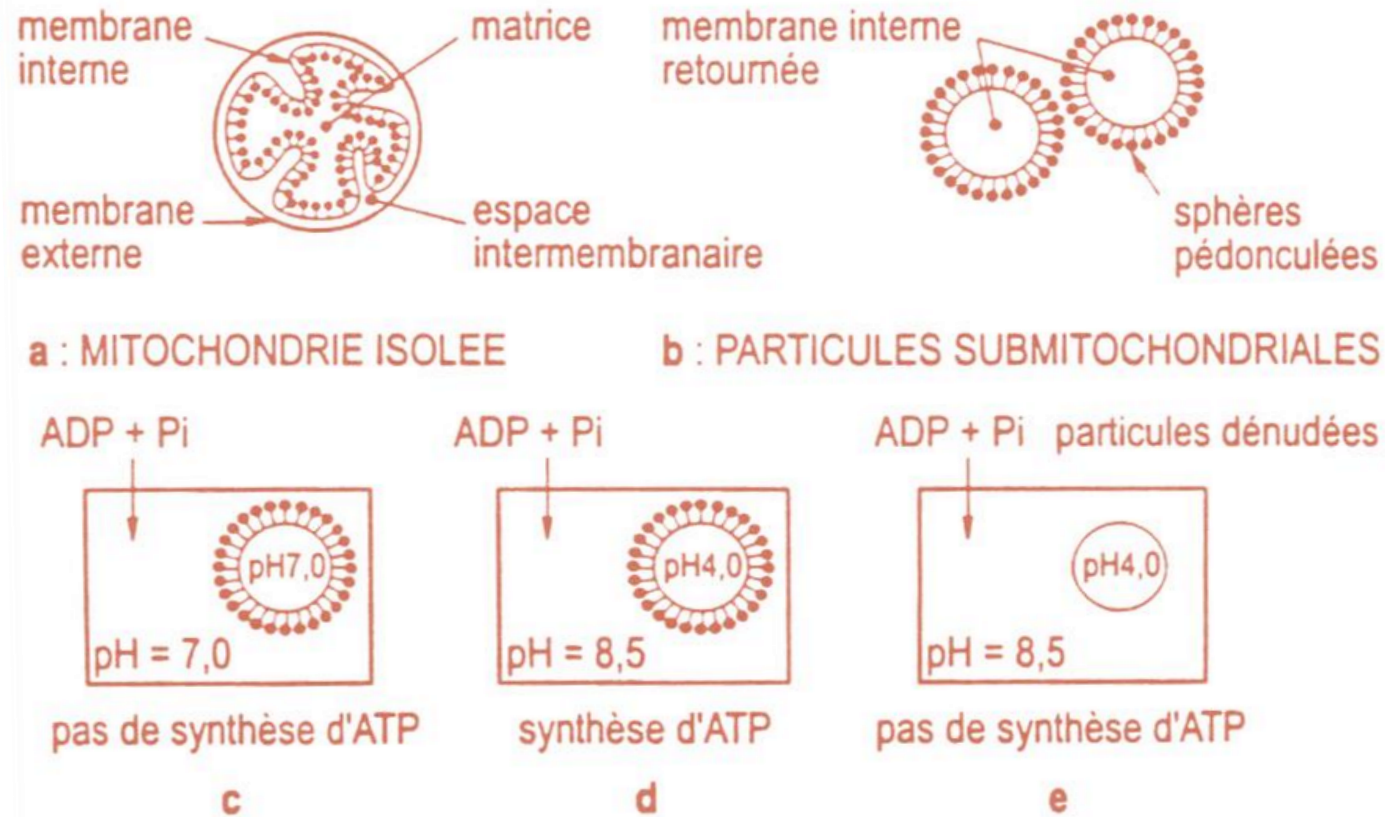
- L'analyse des fractions révèle que seule la matrice contient des décarboxylases, enzymes responsables des décarboxylations.
- Les fractions sont placées dans un milieu expérimental contenant du dioxygène, des composés réduits R'H<sub>2</sub> (NADH, H<sup>+</sup>), de l'ADP et du Pi (phosphate inorganique)

Fraction mitochondriale utilisée	Résultats
Fragments de membrane externe	Pas de production d'ATP Pas d'oxydation des composés R'H <sub>2</sub> (NADH, H <sup>+</sup> ) en R' (NAD <sup>+</sup> ) (en présence de dioxygène)
Fragments de membrane interne	Production d'ATP Oxydation des composés R'H <sub>2</sub> en R' (en présence de dioxygène)

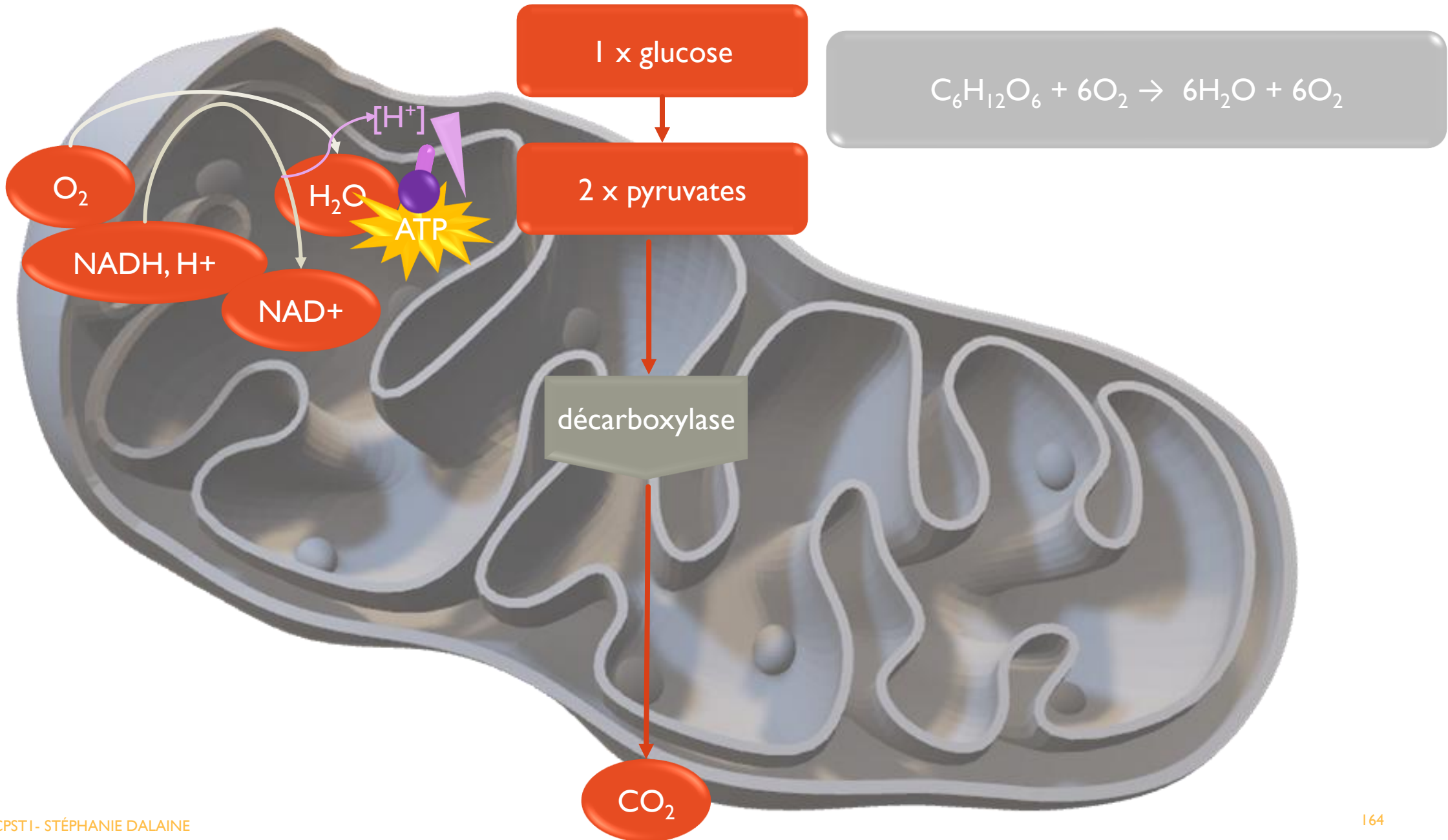


## B. LA FORMATION D'ATP PAR CONVERSION D'UNE FORCE PROTOMOTRICE : COUPLAGE OSMO-CHIMIQUE, RÔLE DES ATP-SYNTHÉTASES

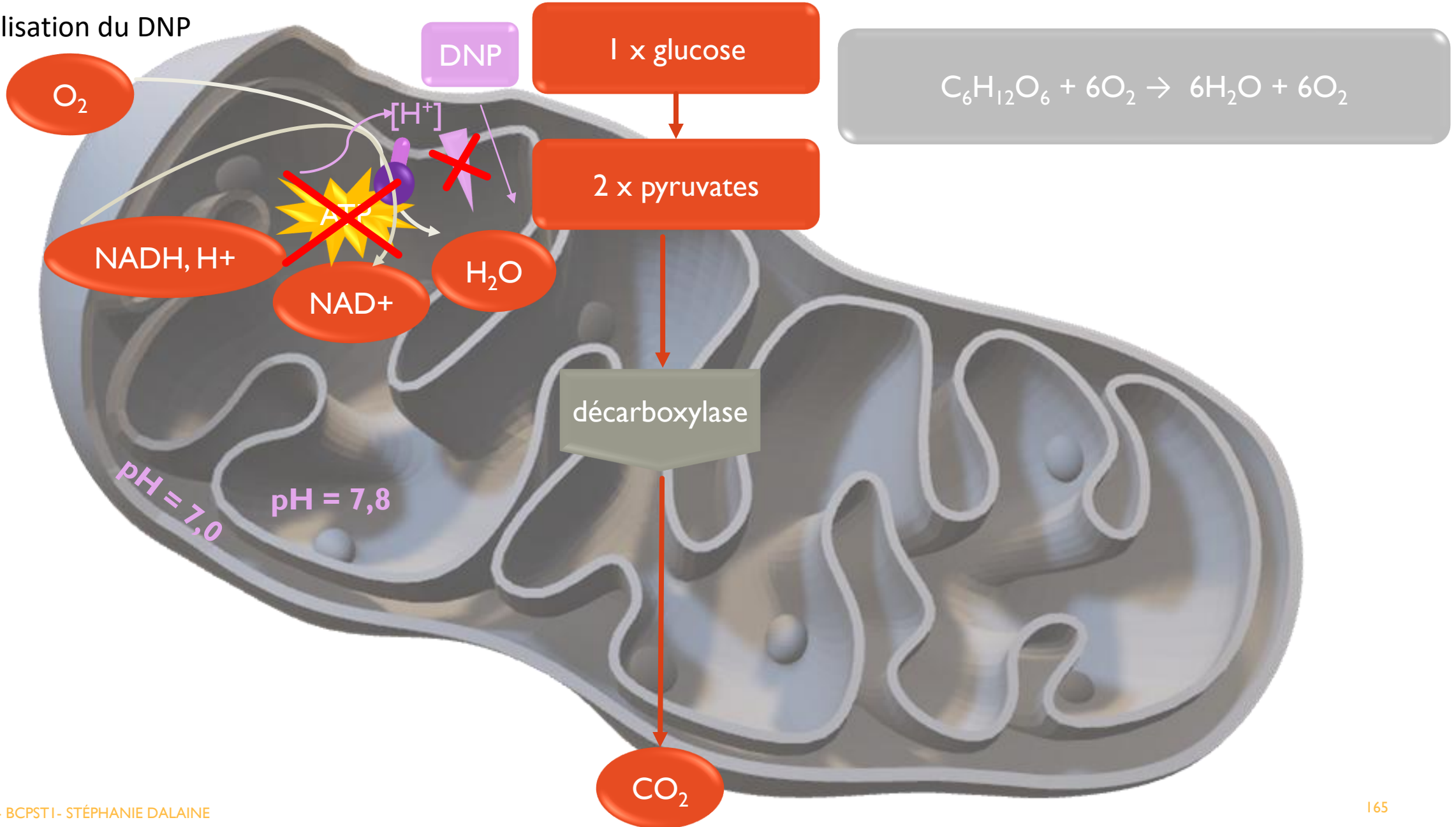
### 3. Mise en évidence d'un couplage osmo-chimique



*Schématisation des différentes observations sur particules submitochondriales*

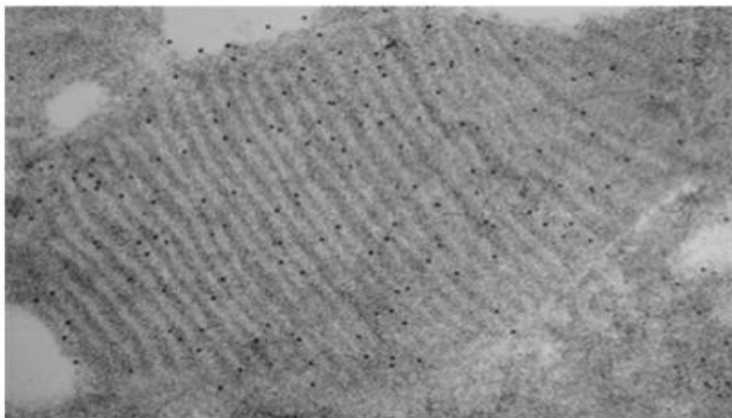
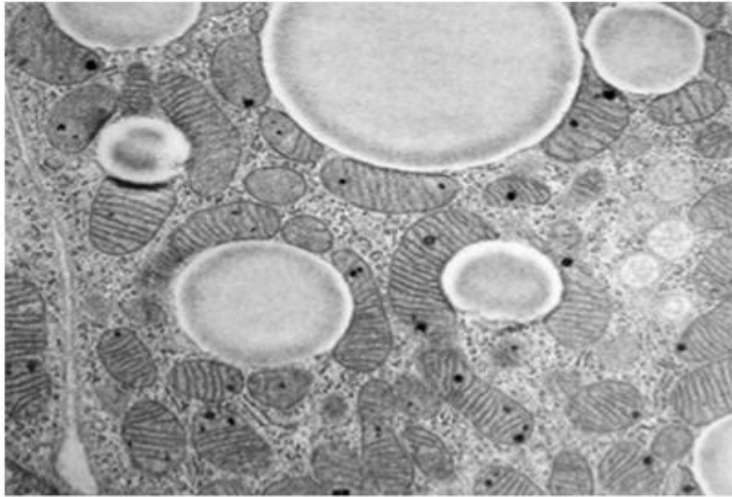


❖ Utilisation du DNP



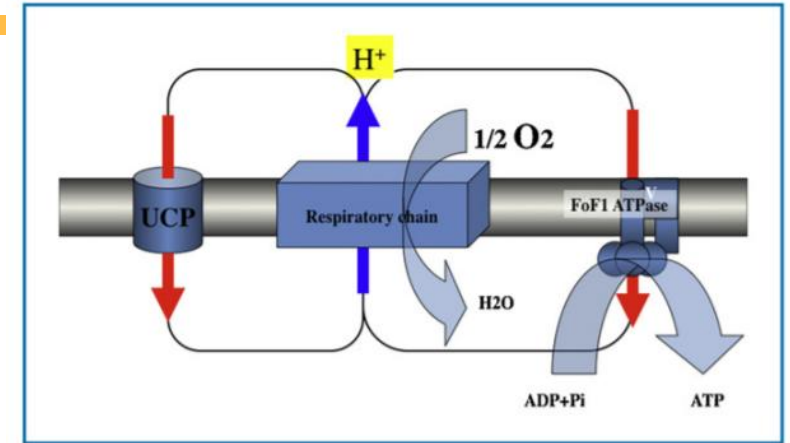
## ❖ Encart sur le tissu adipeux brun

Le tissu adipeux brun humain



**Figure 2.** Adipocyte brun et immunomarquage d'UCP1 mitochondriale. Les adipocytes bruns contiennent des gouttelettes de triglycérides et de nombreuses mitochondries striées, au sein desquelles UCP1 est détectée par les anticorps isolés par l'auteur (figure aimablement fournie par le Dr Saverio Cinti, université d'Ancona).

Dans les adipocytes du tissu adipeux brun, l'UCP1 est une protéine canal à  $H^+$  qui court-circuite le passage des ions  $H^+$  par l'ATP synthase



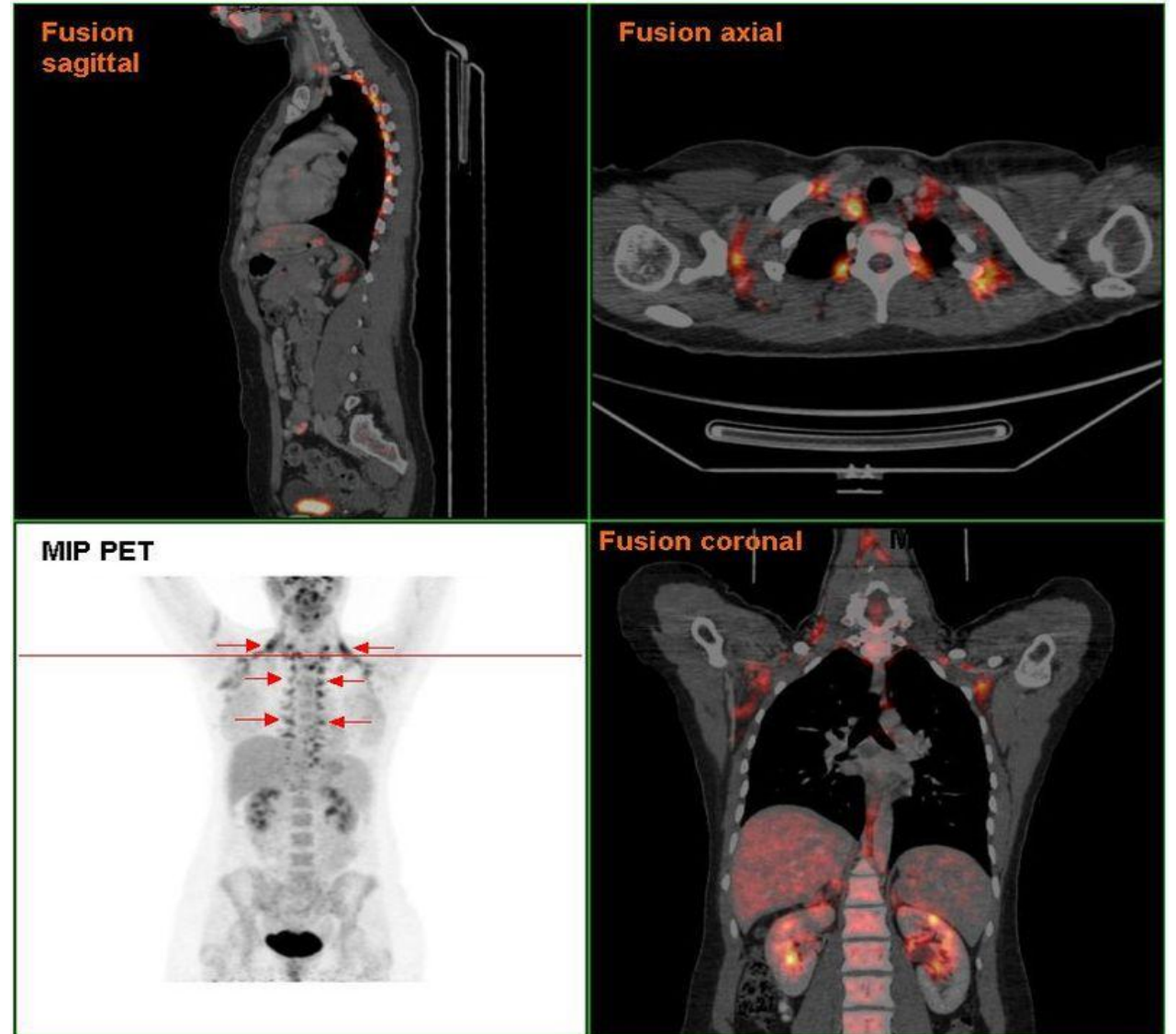
**Figure 1.** Le circuit de protons dans la membrane interne mitochondriale. Dans les mitochondries de tous les tissus, les complexes I, III et IV des chaînes respiratoires établissent un gradient de protons dont l'utilisation par l'ATP-synthase active la phosphorylation de l'ADP. Ce circuit de protons explique le couplage entre la respiration et la synthèse de l'ATP. Dans les mitochondries des adipocytes bruns, la respiration est exceptionnellement rapide et non limitée par l'ADP ou sa phosphorylation. Un transporteur spécifique de protons, UCP1, shunte l'ATP-synthase. Dans ces conditions, UCP1 abaisse le potentiel membranaire et le gradient électrochimique de protons, active fortement la respiration dont l'énergie, n'étant plus utilisée pour phosphoryler l'ADP, est dissipée sous forme de chaleur (figure aimablement donnée par le Dr Frédéric Boullaud, Institut Cochin).

*Le rôle de l'UCP1, agent découplant dans la production de chaleur sans production d'ATP.*

*Localisation de l'agent découplant UCP1 dans la membrane interne de mitochondries des adipocytes bruns (D'après Le tissu adipeux brun chez l'homme Daniel Ricquier)*

Le tissu adipeux brun est très présent chez les espèces hibernantes et les nouveaux nés.

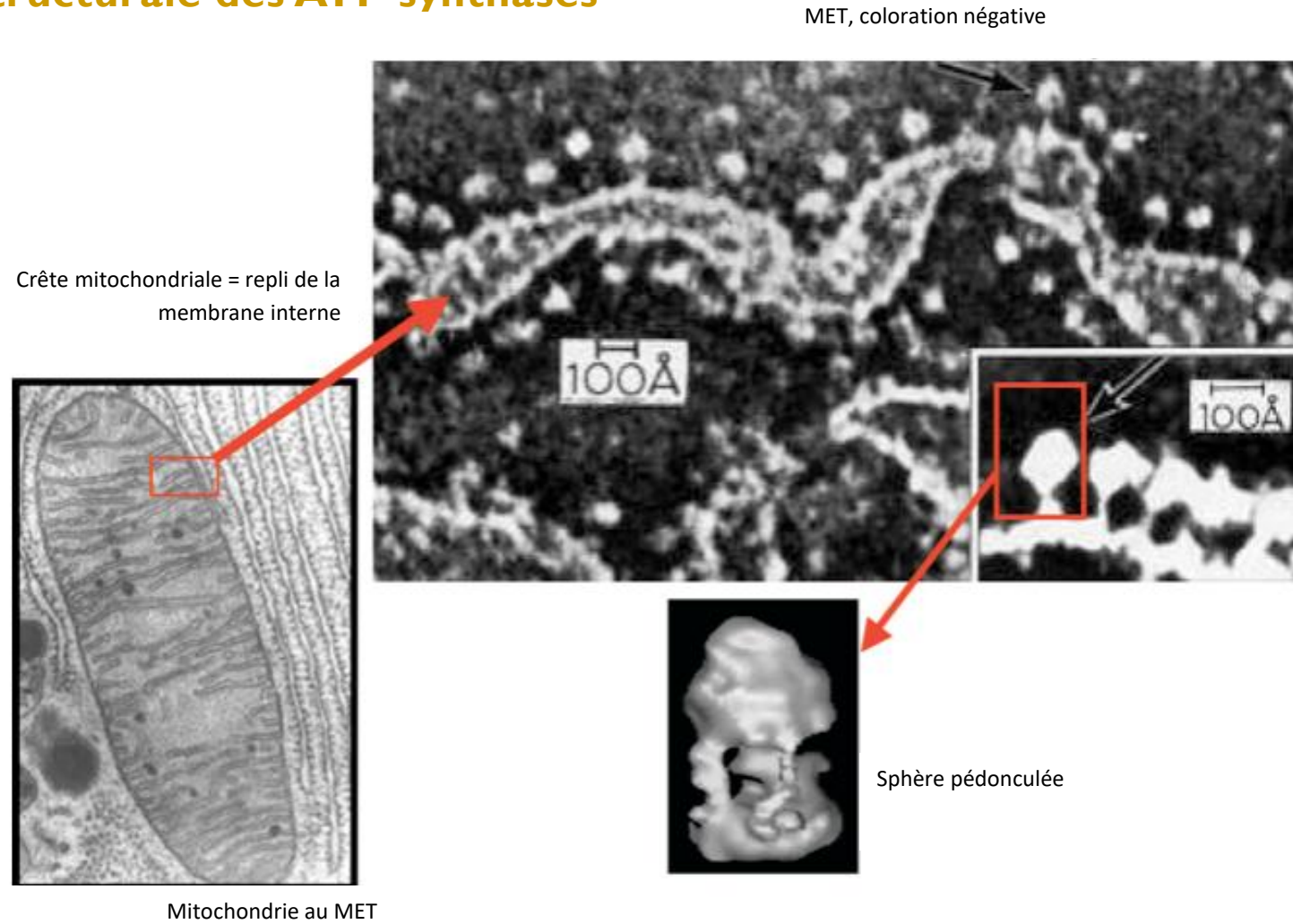
Mais également mis en évidence chez l'Homme adulte.



*Tissu adipeux brun chez une femme*

# B. LA FORMATION D'ATP PAR CONVERSION D'UNE FORCE PROTOMOTRICE : COUPLAGE OSMO-CHIMIQUE, RÔLE DES ATP-SYNTHÉTASES

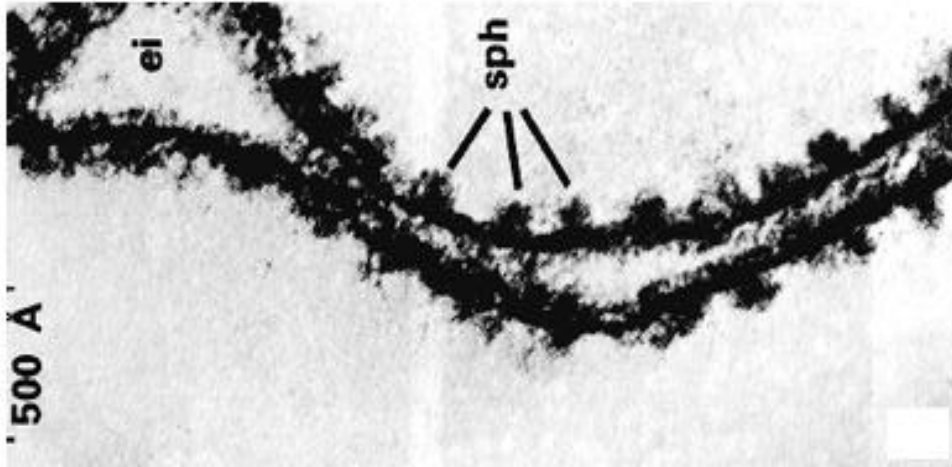
## 4. Caractérisation structurale des ATP synthases



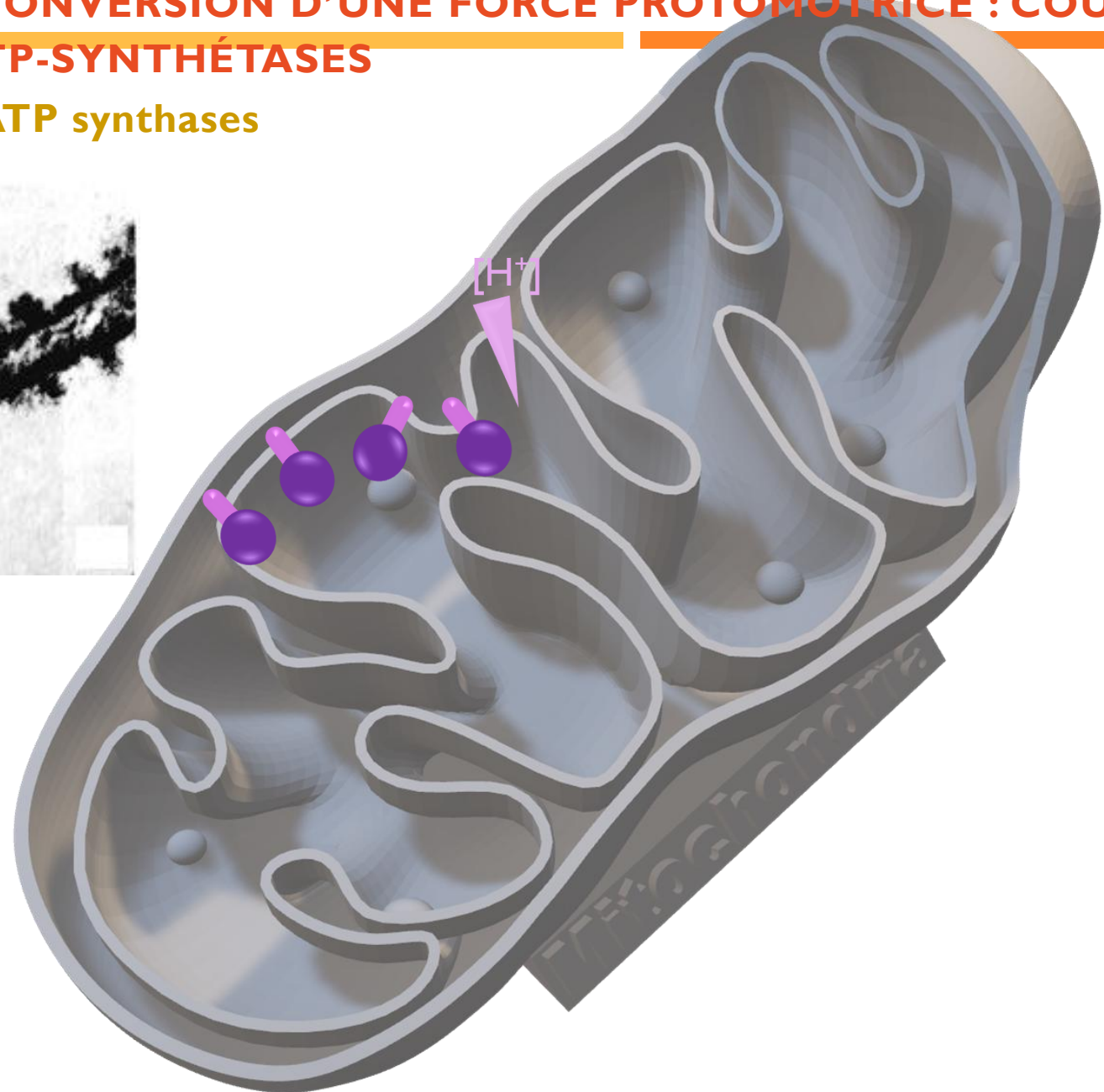
*Observation des sphères pédonculées (= ATP synthases) au MET sur la membrane interne de mitochondrie*

## B. LA FORMATION D'ATP PAR CONVERSION D'UNE FORCE PROTOMOTRICE : COUPLAGE OSMO-CHIMIQUE, RÔLE DES ATP-SYNTHÉTASES

### 4. Caractérisation structurale des ATP synthases



Jusqu'à 15 000 ATP synthétases par mitochondrie

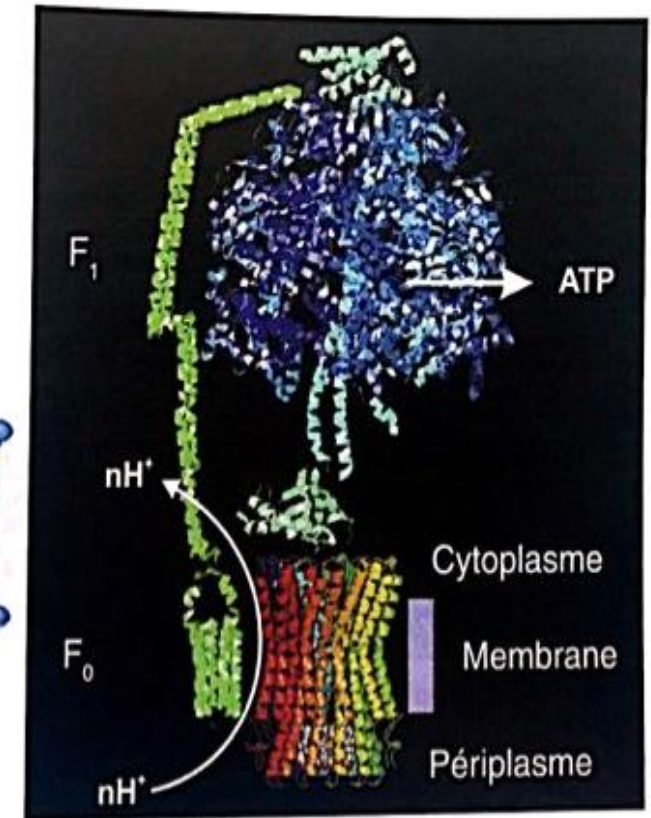
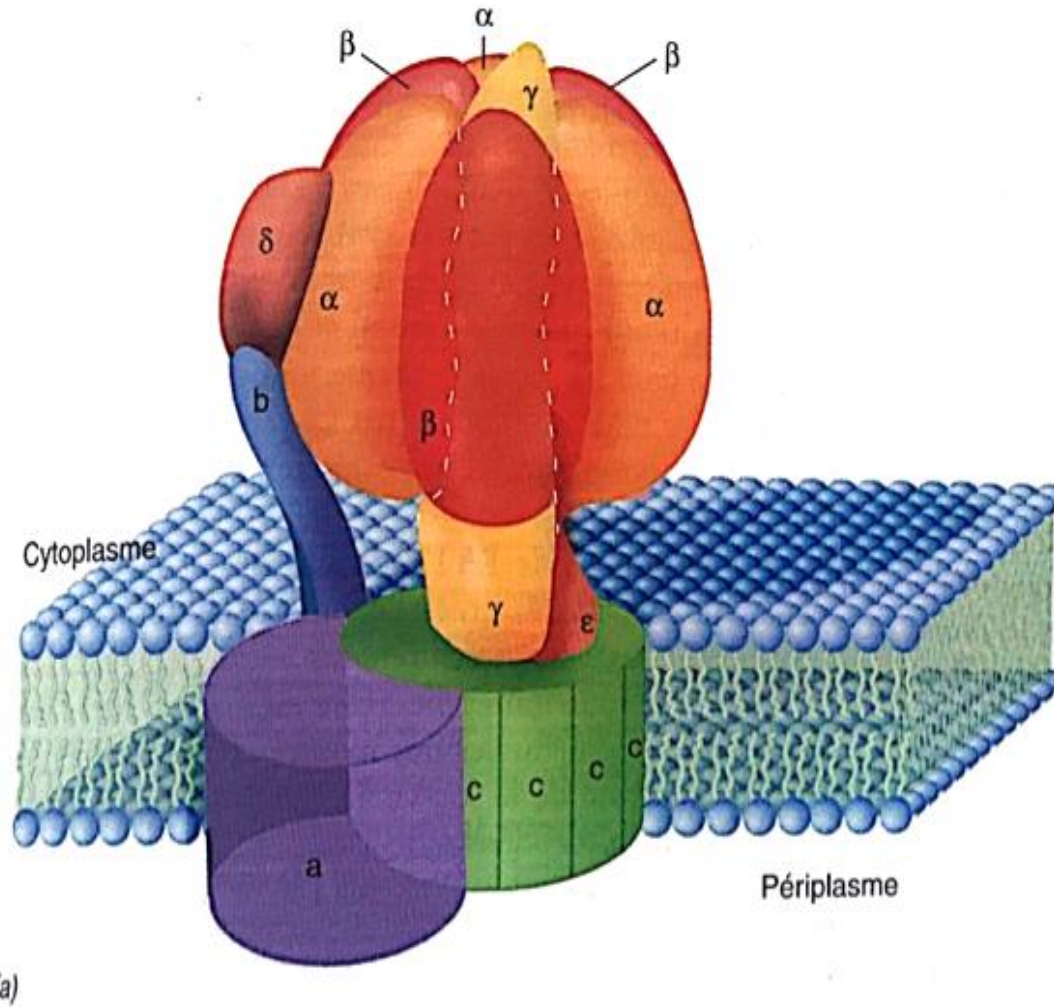


## B. LA FORMATION D'ATP PAR CONVERSION D'UNE FORCE PROTOMOTRICE : COUPLAGE OSMO-CHIMIQUE, ROLE DES ATP-SYNTHÉTASES

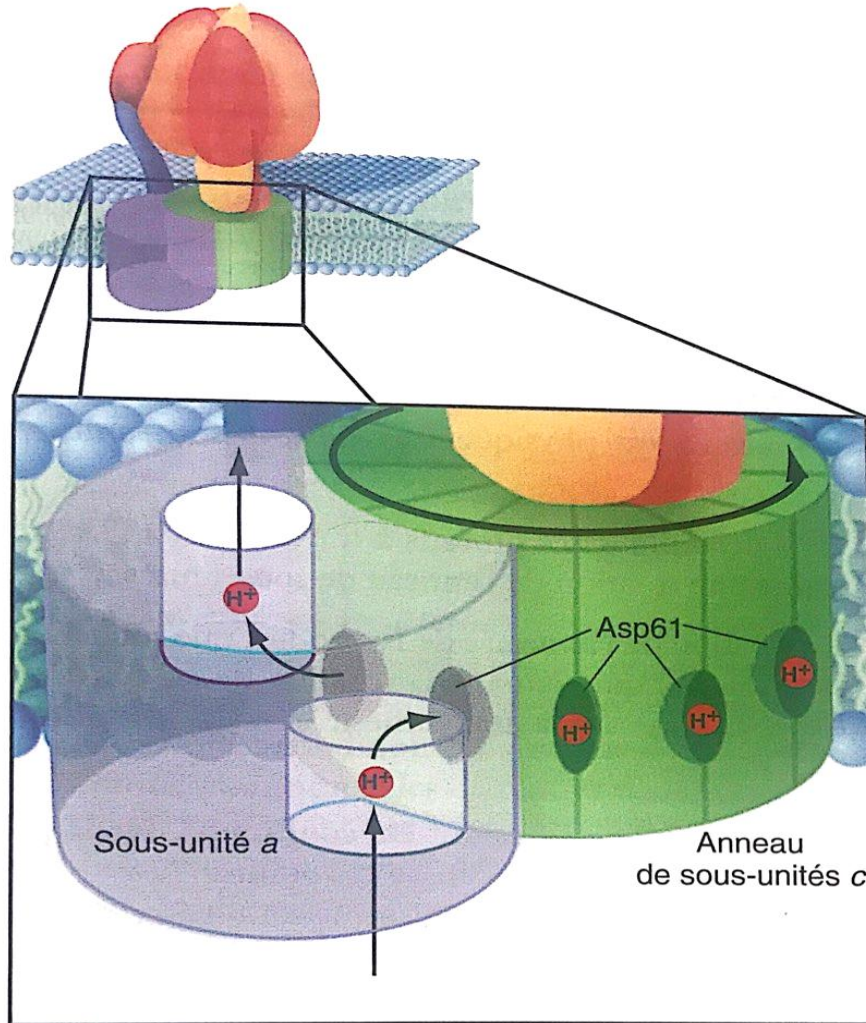
### 4. Caractérisation structurale des ATP synthases

F<sub>1</sub> hydrophile, catalytique  
côté matriciel

F<sub>0</sub> hydrophobe, flux de  
protons, une partie  
rotatoire



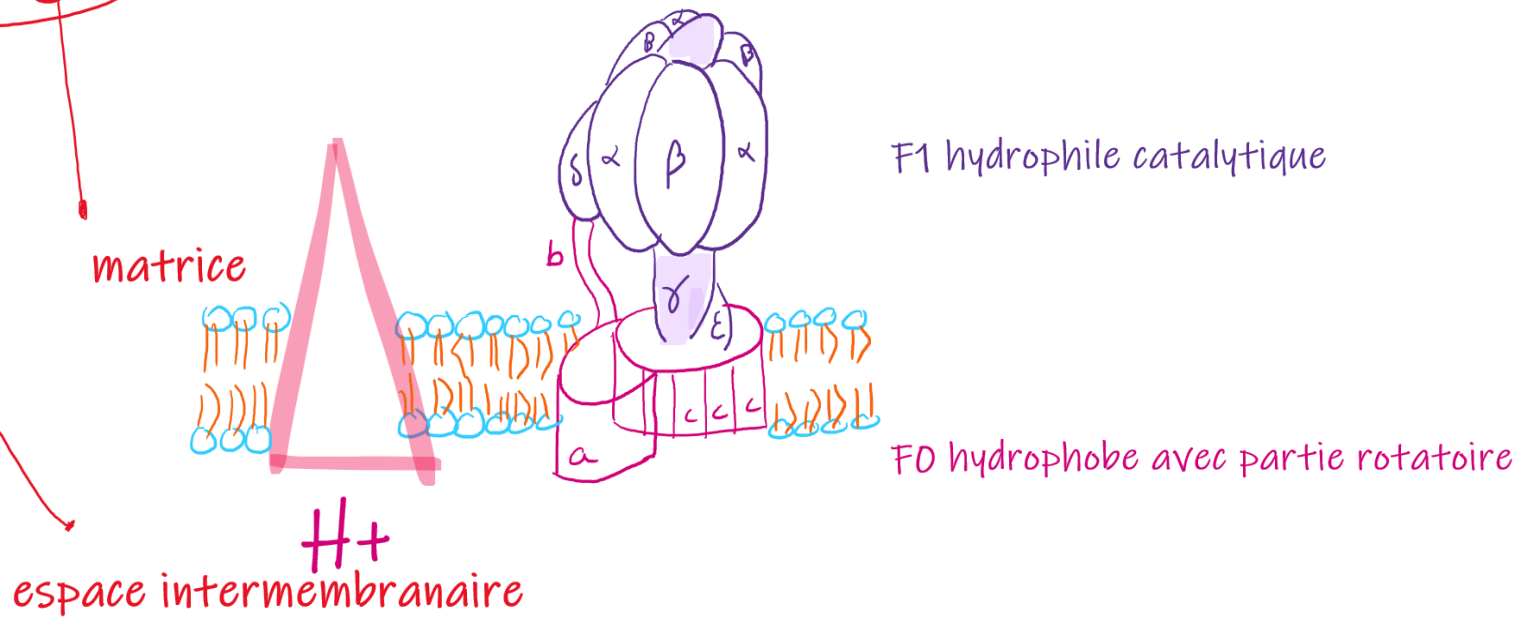
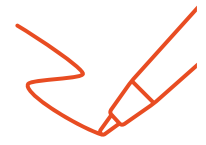
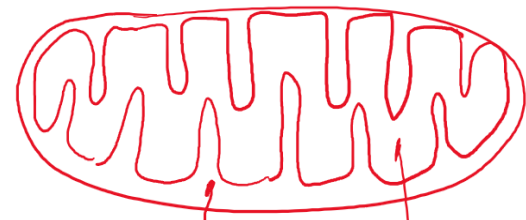
Structure de l'ATP synthétase (D'après Karp, 3<sup>e</sup> édition, p.203.)



- Fixation du proton sur asp
- ⇒ Changement de conformation
- ⇒ Déplacement de 30° de l'anneau
- ⇒ Tour complet du proton
- ⇒ Libération du H<sup>+</sup> dans le canal a vers espace intermembranaire

*Modèle illustrant la diffusion des protons couplée à la rotation de l'anneau c du complexe F<sub>0</sub>.  
(D'après Karp, 3<sup>e</sup> édition, p.203.)*

1  $\mu$ m

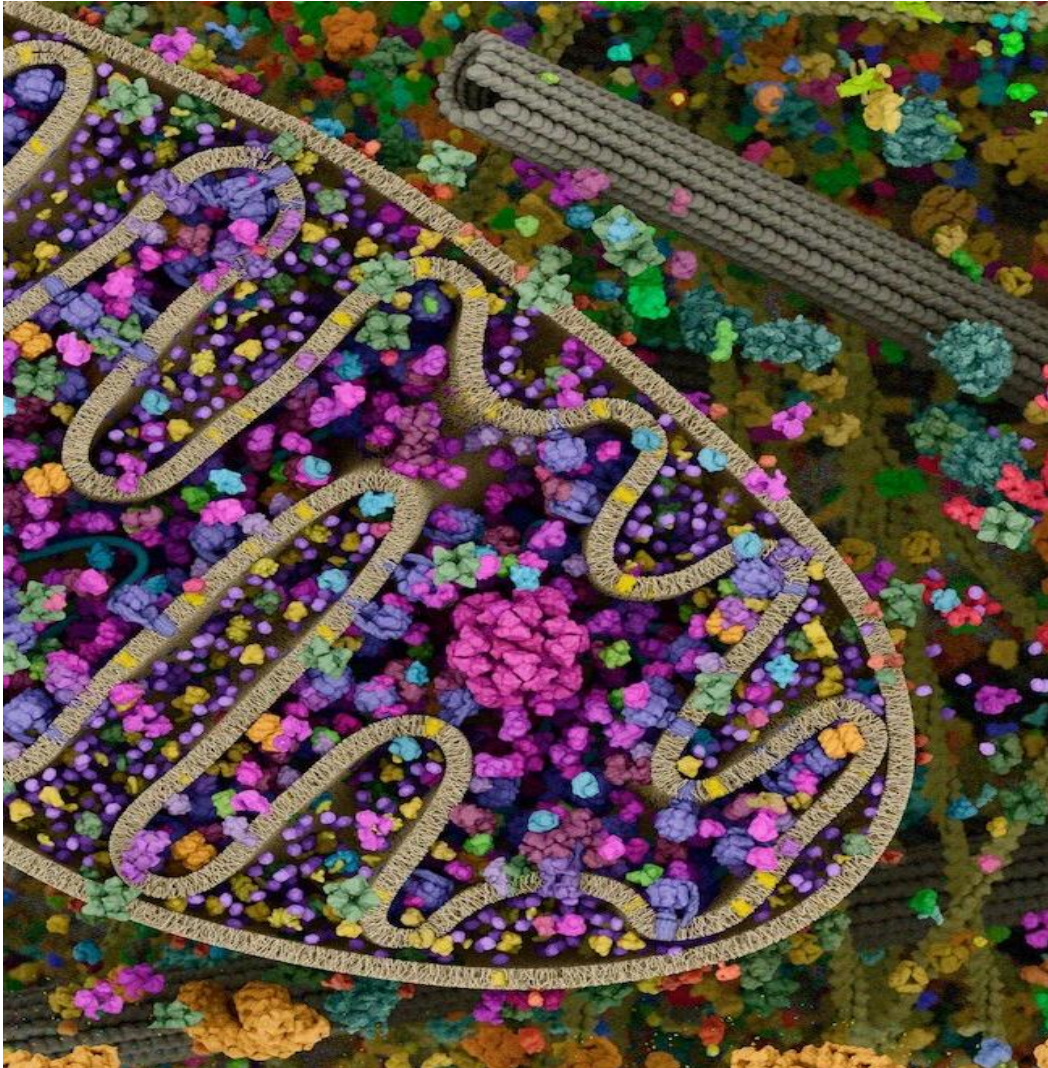


## ATP synthétase mitochondriale (S. Dalaine)

La tige  $\gamma$  entraînée par la rotation de l'anneau c tourne également.

## B. LA FORMATION D'ATP PAR CONVERSION D'UNE FORCE PROTOMOTRICE : COUPLAGE OSMO-CHIMIQUE, RÔLE DES ATP-SYNTHÉTASES

### 4. Caractérisation structurale des ATP synthases

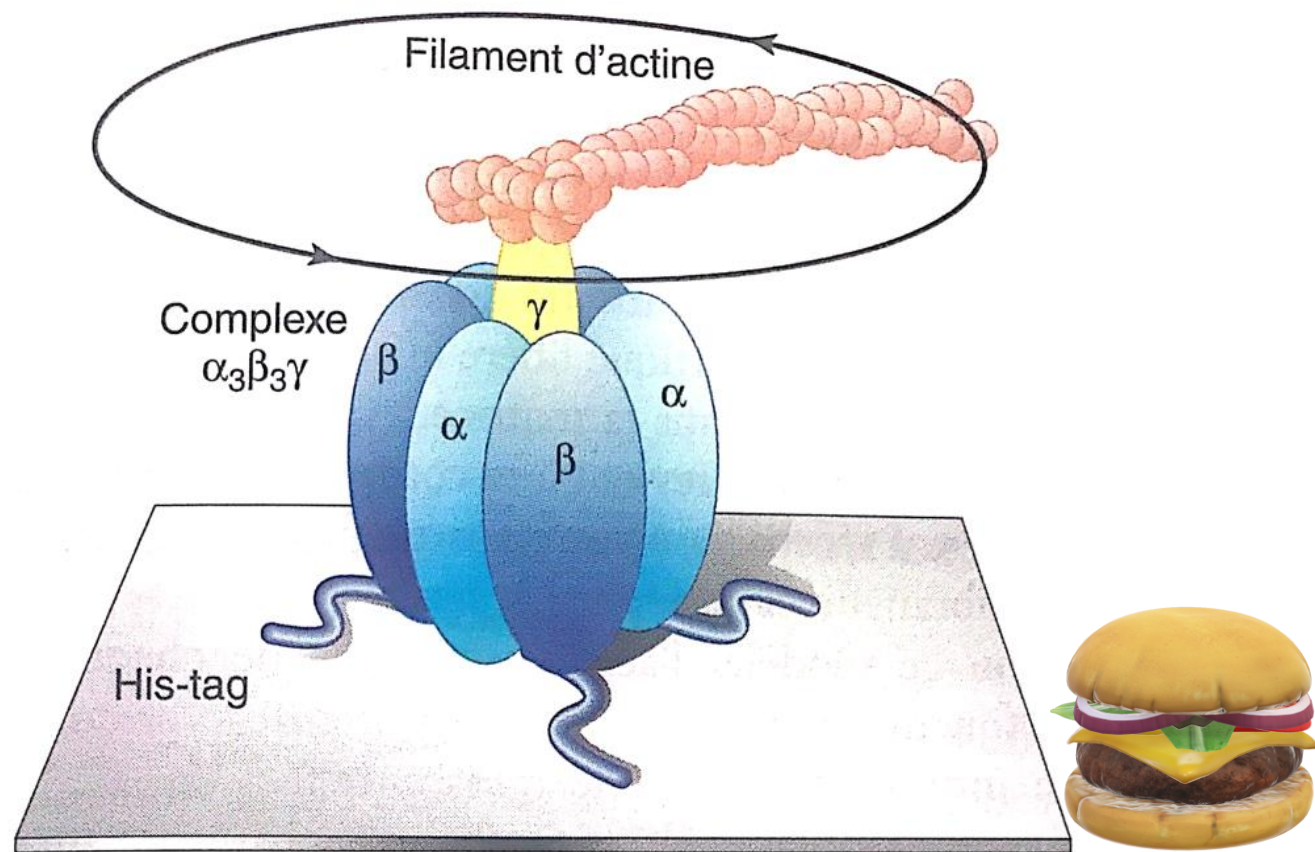


Identifier les ATP synthétases dans cette représentation.

## B. LA FORMATION D'ATP PAR CONVERSION D'UNE FORCE PROTOMOTRICE : COUPLAGE OSMO-CHIMIQUE, ROLE DES ATP-SYNTHÉTASES

### 5. Caractérisation fonctionnelle des ATP synthases

#### 5.1. Mise en évidence expérimentale de la rotation



Lamelle enduite de Ni-NTA

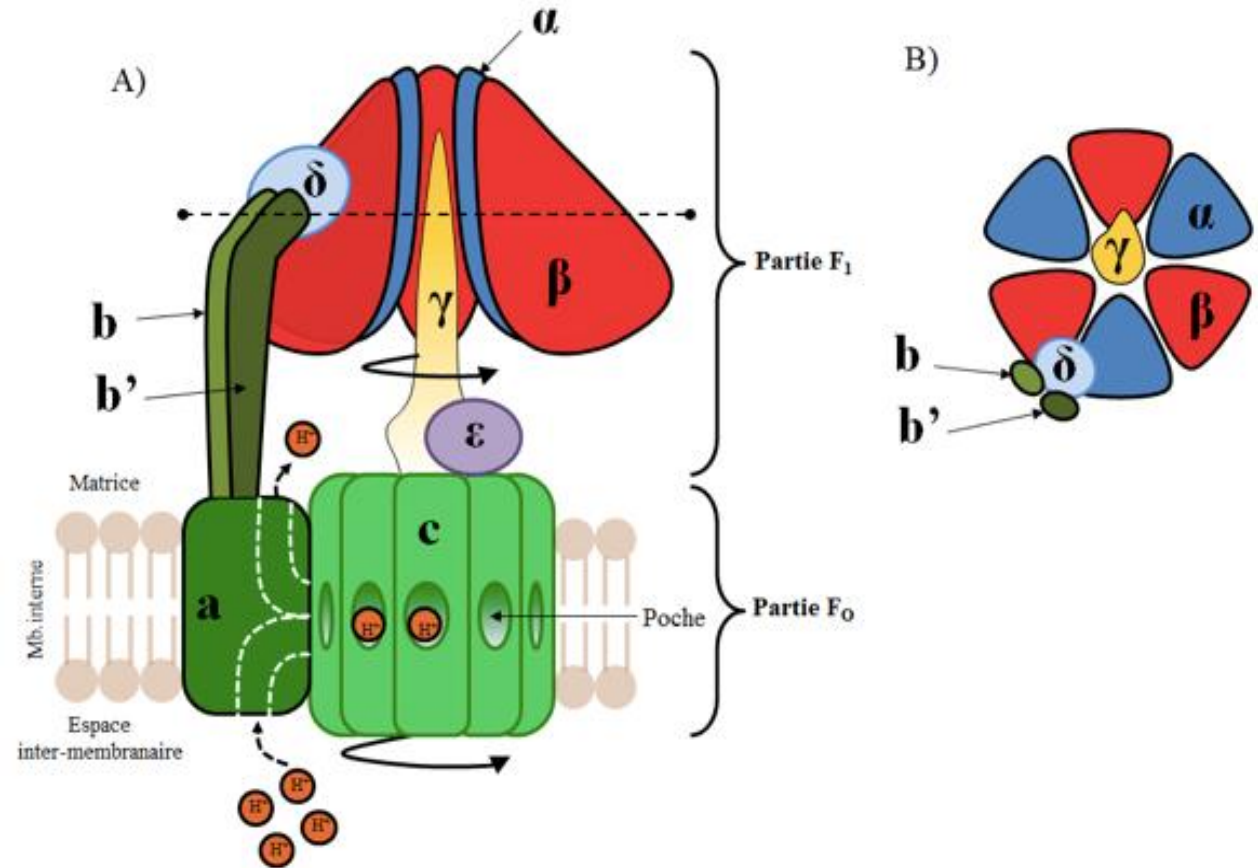
Observation directe de la catalyse rotatoire (D'après Karp, 3<sup>e</sup> édition, p. 207)

Fixation à la sous-unité  $\gamma$  d'un filament d'actine marqué par fluorescence  
+ Ajout d'ATP  
⇒ Rotation du filament  
⇒ L'ATP synthétase a fonctionné en hydrolase, on parle alors d'ATPase  
⇒ Tout dépend du gradient de protons!

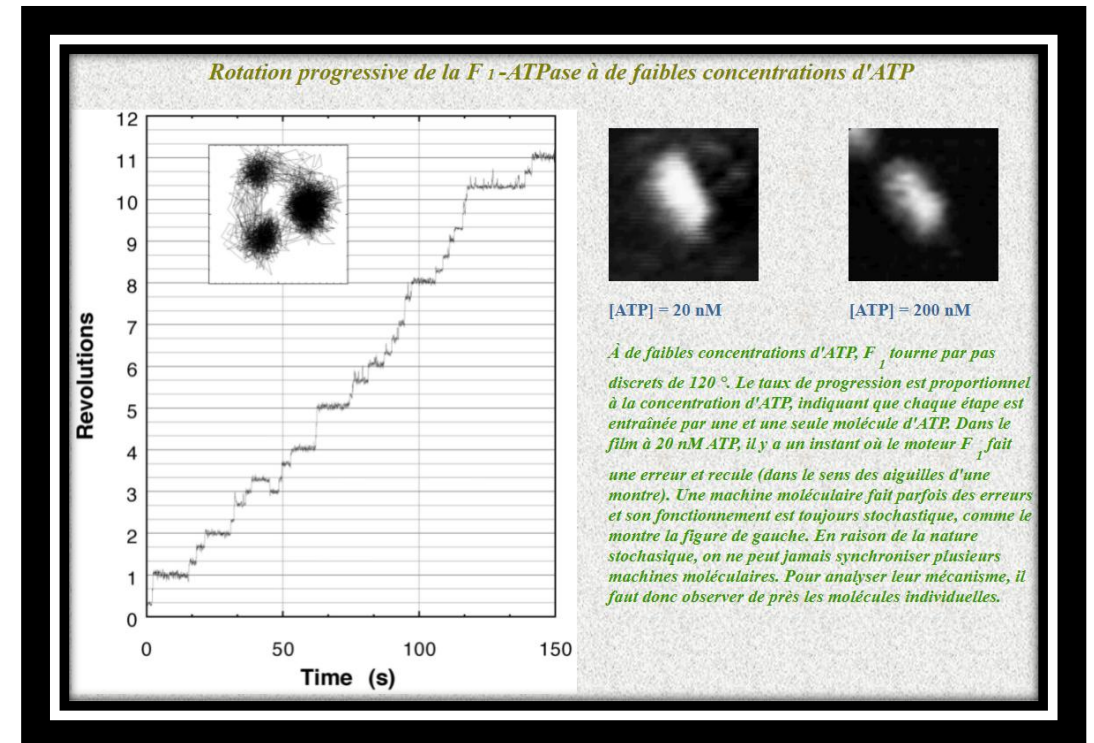
ATP synthétase = ATP synthase =  
synthèse d'ATP (couplage osmo-  
chimique)  
ATPase = hydrolyse d'ATP  
(couplage chimio-osmotique)

## B. LA FORMATION D'ATP PAR CONVERSION D'UNE FORCE PROTOMOTRICE : COUPLAGE OSMO-CHIMIQUE, RÔLE DES ATP-SYNTHÉTASES

Entrée de protons de l'espace intermembranaire dans l'anneau c  
⇒ Rotation de l'anneau c  
⇒ Rotation de la tigelle  $\gamma$   
⇒ Changement de conformation des sous-unités  $\beta$   
⇒ Passage de la conformation libération d'ATP et // sortie de  $H^+$  de l'anneau c vers le demi-canal a ouvert vers la matrice



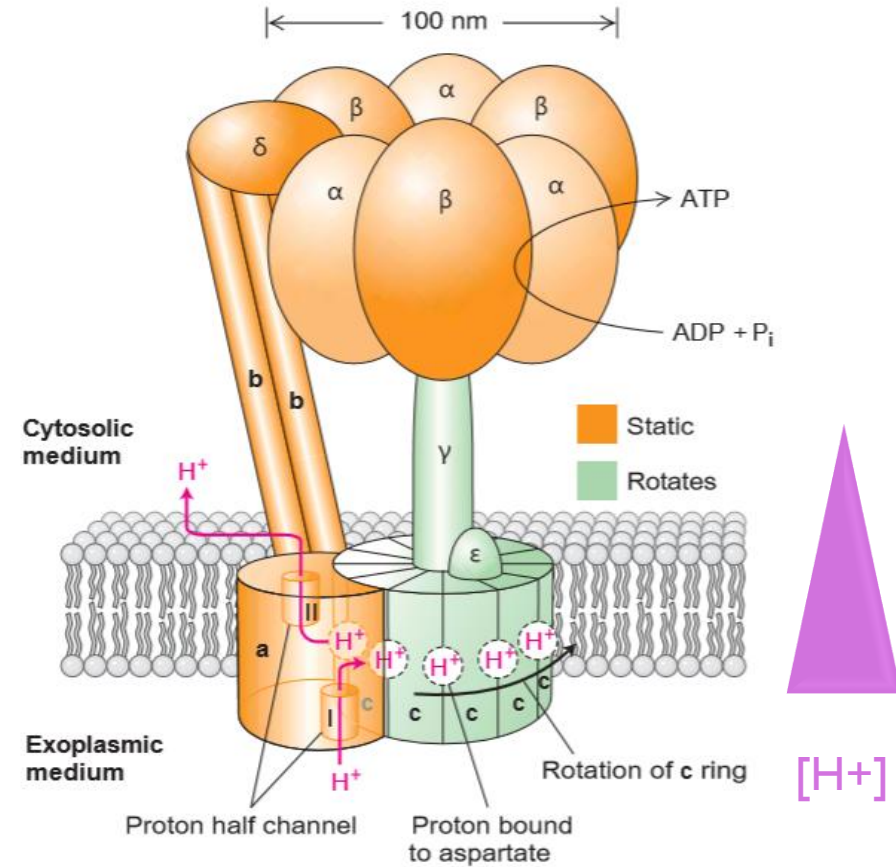
## B. LA FORMATION D'ATP PAR CONVERSION D'UNE FORCE PROTOMOTRICE : COUPLAGE OSMO-CHIMIQUE, RÔLE DES ATP-SYNTHÉTASES



Fonctionnement stochastique du  
moteur moléculaire

## B. LA FORMATION D'ATP PAR CONVERSION D'UNE FORCE PROTOMOTRICE : COUPLAGE OSMO-CHIMIQUE, RÔLE DES ATP-SYNTHÉTASES

L'ATP SYNTHÉTASE OU ATP SYNTHASE RÉALISE UN COUPLAGE OSMO-CHIMIQUE

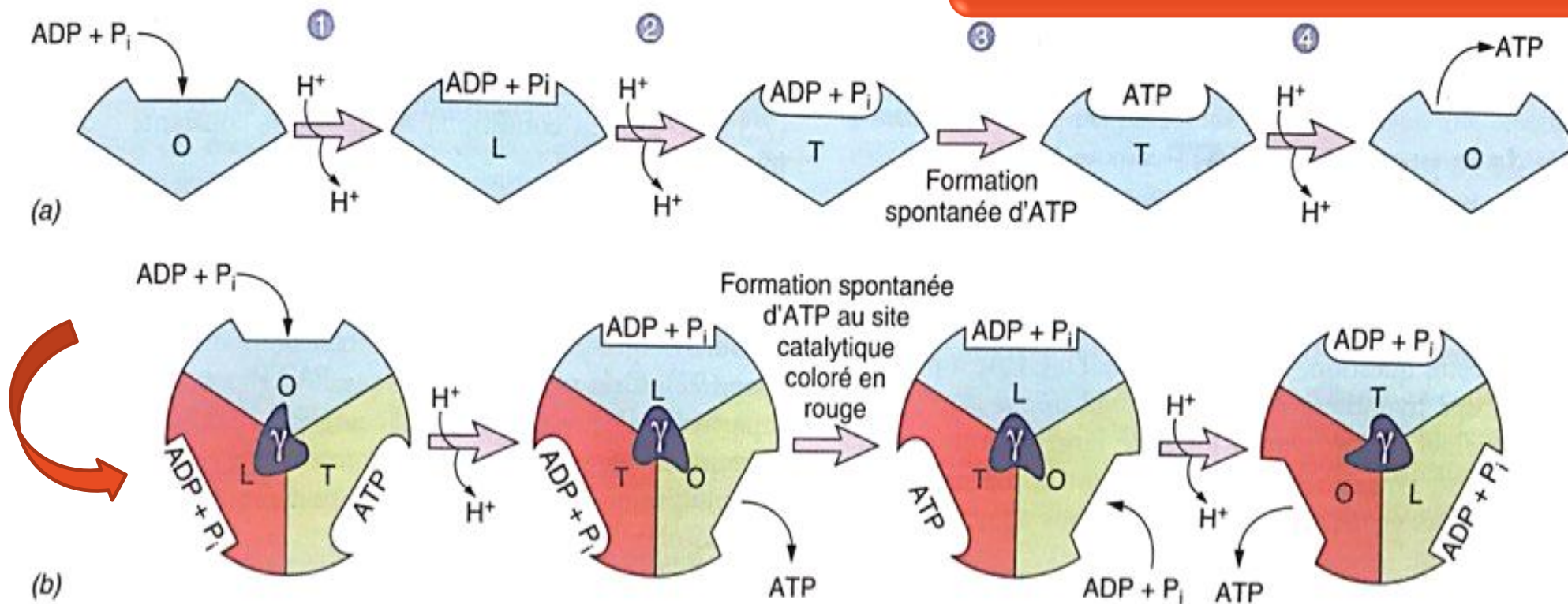


Modèle de fonctionnement de l'ATP synthétase (Karp, 3<sup>e</sup> édition)

## B. LA FORMATION D'ATP PAR CONVERSION D'UNE FORCE PROTOMOTRICE : COUPLAGE OSMO-CHIMIQUE, RÔLE DES ATP-SYNTHÉTASES

### ❖ La synthèse d'ATP par renversement d'affinité

Passage de 3H<sup>+</sup> rotation de 120° passage O vers L, puis L vers T  
⇒ 1 ATP produit par passage de 3 H<sup>+</sup>  
⇒ 3 ATP produits par tour complet soit par passage de 9H<sup>+</sup>



*Modèle de fonctionnement de la tête catalytique de l'ATP synthase (Karp, 3<sup>e</sup> édition, p.206)*

Changement synchrone de conformation des trois sous-unités  $\beta$   
**Renversement d'affinité des substrats (ADP et Pi en conformation T se lient et donnent ATP)**

# BILAN

[https://www.youtube.com/watch?v=CN2XOe\\_c0iM](https://www.youtube.com/watch?v=CN2XOe_c0iM)



# SUJETS D'ORAUX

- Du carbone minéral au carbone organique dans une cellule végétale chlorophyllienne
- Fixation et réduction du carbone minéral (2023)
- Énergie lumineuse et autotrophie au carbone
- Le chloroplaste, un organe compartimenté
- Le CO<sub>2</sub> et les organismes végétaux
- L'autotrophie au carbone (2023)
- Comparaison de l'autotrophie chez Nitrobacter et chez les Chlorophytes (2023)
- L'ATP synthase
- Les couplages énergétiques dans la cellule
- Les conversions d'énergie
- La membrane interne de la mitochondrie : relations structure – fonction
- ATP et couplages énergétiques

La production de l'ATP dans les cellules animales

L'ATP au cœur des processus énergétiques de la cellule

Les conversions énergétiques de types chimioosmotiques et osmochimiques

Les différents modes de formation de l'ATP dans les grandes voies du métabolisme énergétique

Les phosphorylations de l'ATP dans le vivant

Les rôles de l'ATP dans la cellule

Les utilisations énergétiques de l'ATP : des transferts et des conversions

