

# La photosynthèse

CRESCENCE Mathieu 15/08/2025

Module 4.2, partie Biologie/Écologie

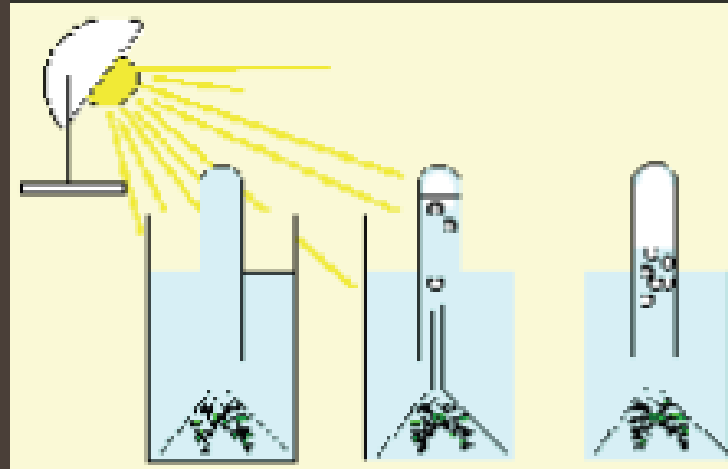
BTS ACD 2

# Sommaire

- [I. Le chloroplaste](#)
- [II. Les pigments](#)
- [III. Les protéines de la photosynthèse](#)
- [IV. Bilan de réaction](#)
- [V. Fixation du CO<sub>2</sub>](#)
- [VI. Cycle de Calvin](#)
- [VII. Voie de régulation et de contrôle](#)
- [VIII. Conclusion sur la photosynthèse](#)

Dans une expérience nous prenons une plante hydrophytes et l'immergeons totalement dans un bécher. On place ce bécher sous une source lumineuse et un entonnoir au dessus de la plante. On nous indique qu'on a rajouté du bicarbonate de soude ( $\text{NaHCO}_3$ ) dans le bécher. Au fil du temps on commence à observer des bulles qui remontent dans l'entonnoir. Il s'agit de bulle d'oxygène issus de la réaction de photosynthèse. On colore les cellules de la plante avec du lugol ( $\text{I}_2$ ), qui se fixe sur l'amidon. On nous indique que la coloration était moins foncée avant l'exposition à la lumière.

# Introduction



Coloration des cellules végétales au lugol



Entrée	Sortie
???	???
???	????
???	

# Introduction

Entrée	Sortie
Eau	Sucre (amidons)
CO <sub>2</sub> (par l'intermédiaire du bicarbonate de soude)	Oxygène (bulle d'eau)
Lumière	



Lumière



Réaction de photosynthèse, dans une cellule chlorophyllienne notamment un chloroplaste

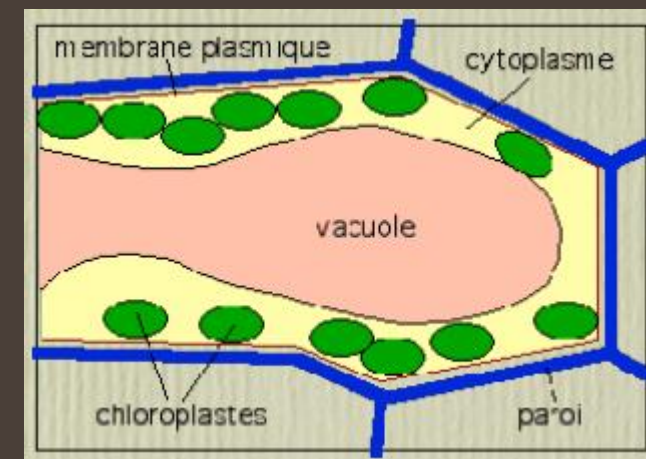
# Introduction

Lumière

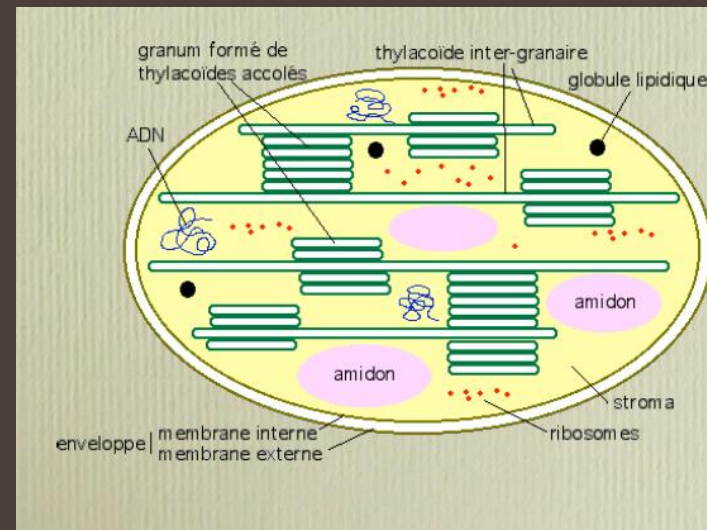


- Définition: La photosynthèse est le processus responsable de la transformation de **l'énergie lumineuse en énergie chimique** au niveau de la plante, autrement dit un processus permettant de synthétiser de la matière organique (sucres) à partir de la lumière du soleil.
- C'est une réaction chimique, intracellulaire qui consomme le  $\text{CO}_2$  et le  $\text{H}_2\text{O}$  afin de produire de l' $\text{O}_2$  et du sucre.

# I. Le chloroplaste



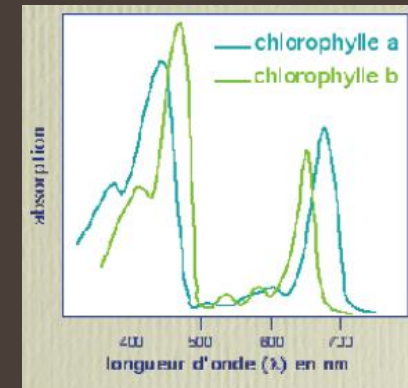
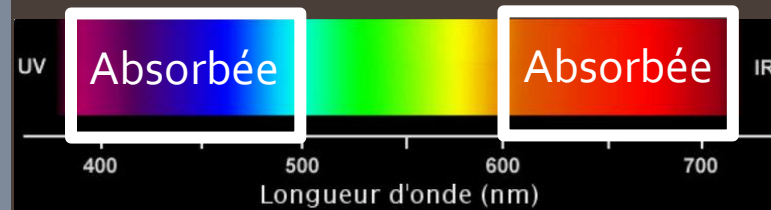
- Le chloroplaste est un organe spécifique à la cellule végétale. C'est l'endroit où se déroule la photosynthèse. C'est un grain ovoïde, recouvert d'une membrane. Il peut contenir de l'amidon et de l'ADN dans ce qu'on appelle le stroma. Mais on retiendra surtout les structures en forme de bâtonnets appelé thylakoïdes. Lorsqu'ils sont empilés, on appelle ça un grana.



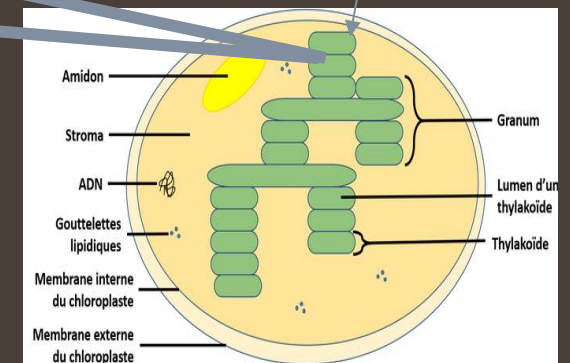
- Dans le thylakoïde, on retrouvera des pigments, substances chimiques associées à une couleur. La coloration des pigments est due à leurs capacités d'absorber certaines longueurs d'onde de la lumière, et d'en réfléchir d'autres. On distinguera souvent dans le groupe des pigments les chlorophylles et les caroténoïdes.

## II. Les pigments

Spectre de longueur d'onde de la lumière



thylakoïde



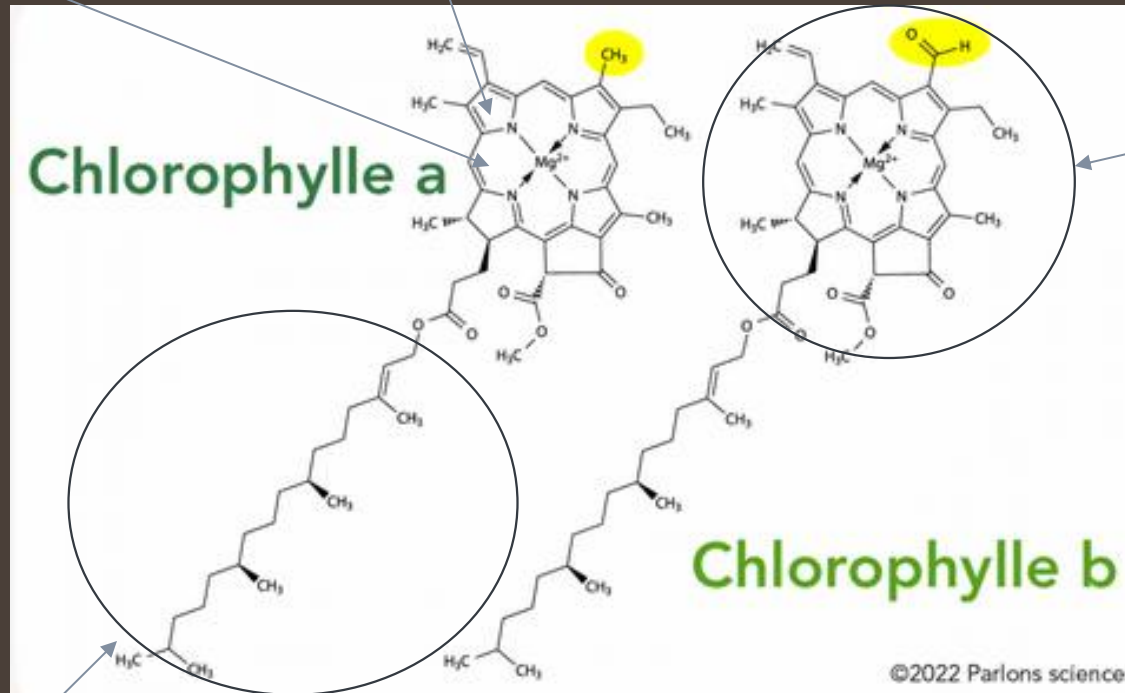
## II. Les pigments

Exemple de pigments	Couleur apparente	Rôle principal
Chlorophylle	Vert	Capture l'énergie lumineuse
Caroténoïdes	Orange/jaune	Protection contre les radicaux libres (atome instables)
Anthocyanes	Rouge/bleu/violet	Protection UV, attraction des pollinisateurs
Xanthophylle	Jaune	Antioxydant, protège contre l'excès de lumière

## II. Les pigments

Pont de méthine qui fait la liaison entre les noyaux pyrroles

1 noyau pyrrole (4 carbones, 1 azote)



Noyau de porphyrine ou structure en hème, avec un ion métallique au centre et 4 noyaux pyrroles

Chaîne hydrophobe composé d'atome de carbone, permettant l'ancrage dans la membrane du thylakoïde.

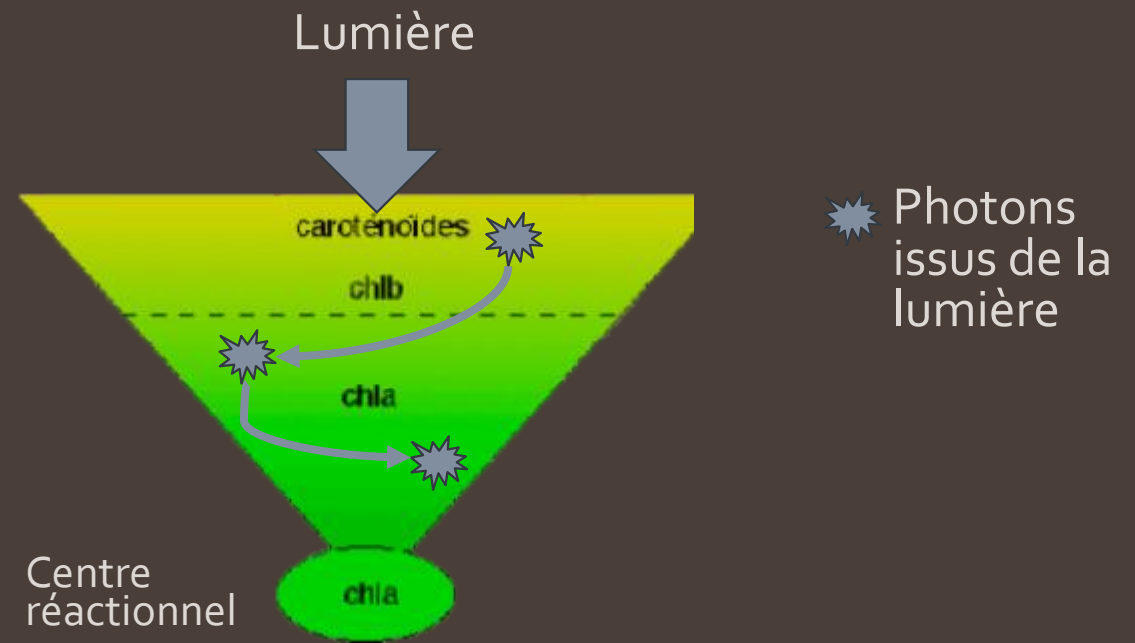
Cette structure permet de **capturer ou transporter l'énergie** :

- La chlorophylle capte la lumière pour la photosynthèse.

$C_{55}H_{72}O_5N_4Mg$

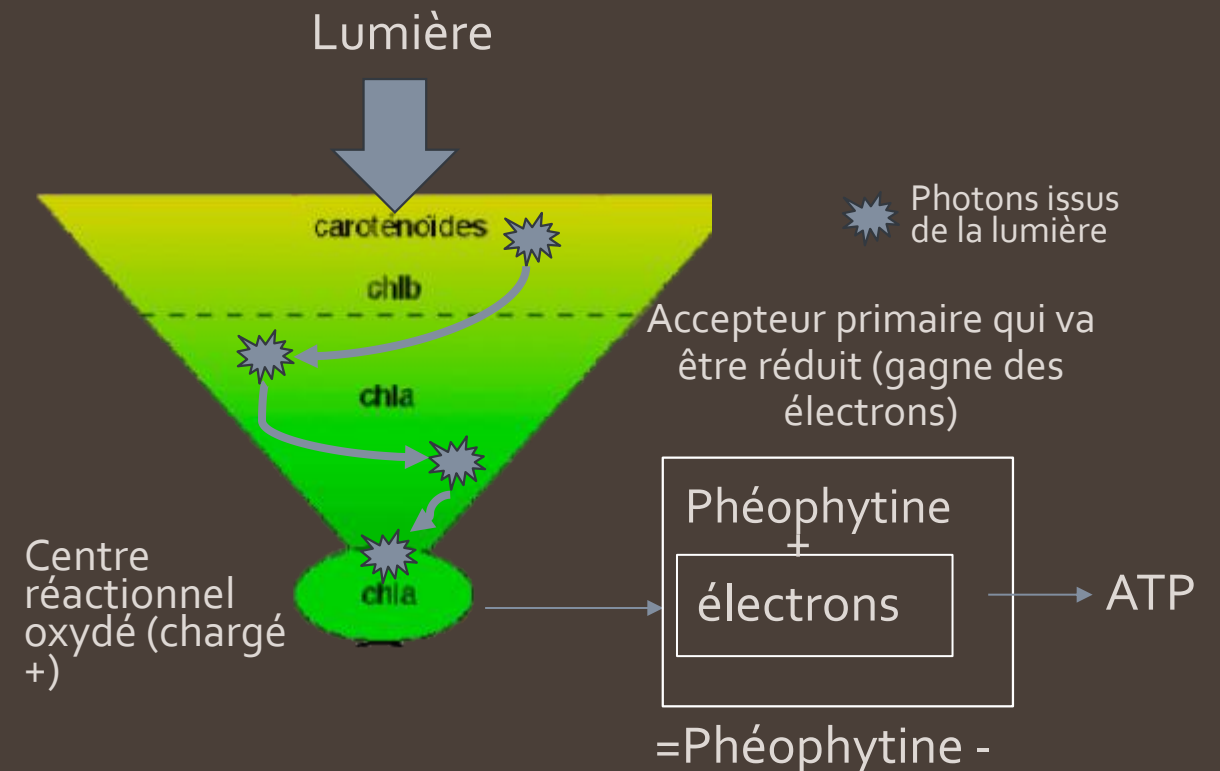
## II. Les pigments

- L'assemblage de pigment dans le thylakoïde; va donner lieu à la formation d'une antenne collectrice de lumière, ou antenne photosynthétiques. Son rôle est de capter l'énergie lumineuse et de la transporter sur le lieu de sa transformation chimique.
- L'énergie des photons va être drainer jusqu'à une **chlorophylle a**, qui fait partie d'une protéine, qu'on appelle le **centre réactionnel**.



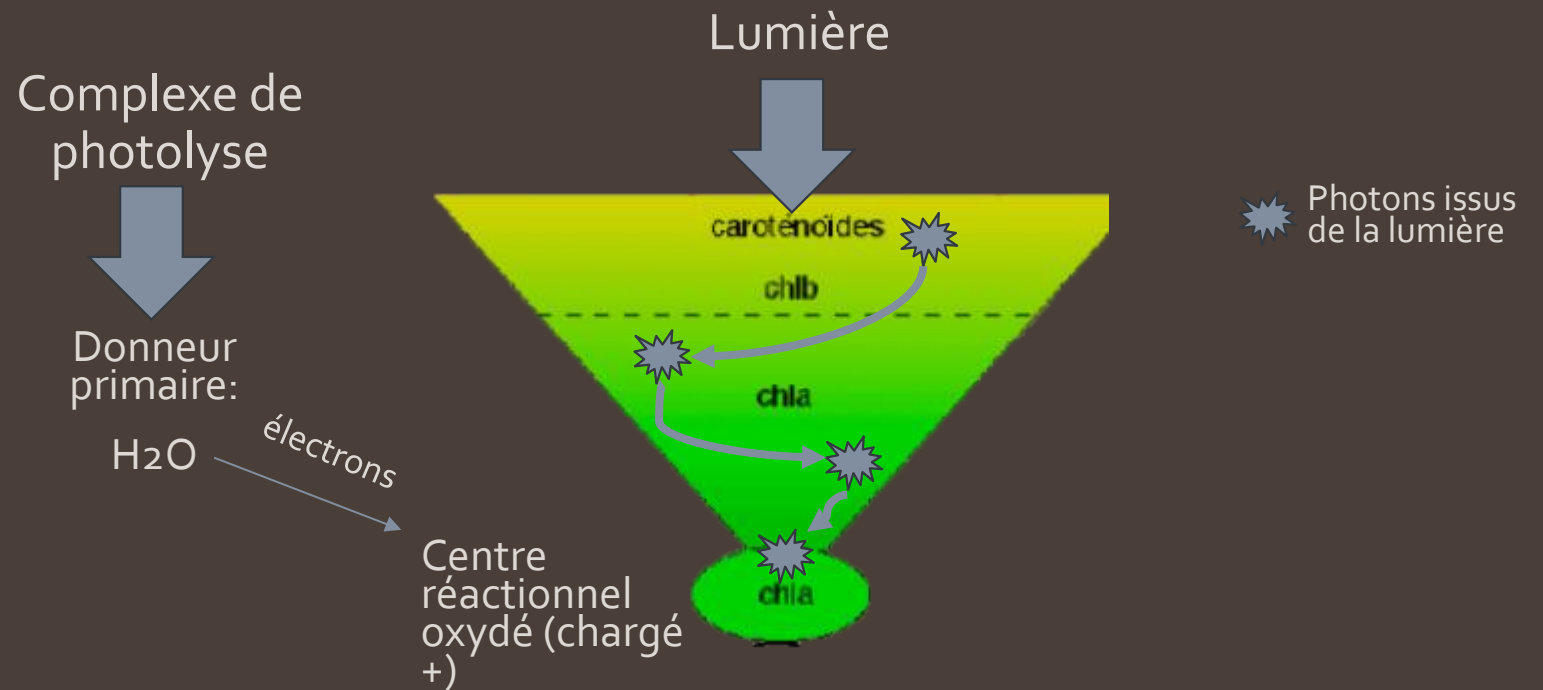
## II. Les pigments

- L'arrivée du photon dans le centre réactionnel va lui faire perdre des électrons. Le centre réactionnel devient chargé positivement.
- Ces électrons libérés, vont être acceptés par diverses molécules, dont, la pheophytine, ou la ferredoxine.
- Ces molécules vont transmettre l'électron, dans une chaîne de transporteur d'électron, qui produira de l'ATP ou du NADPH



## II. Les pigments

- Le centre réactionnel a perdu un électron, il lui faut combler ce manque. Le donneur de cet électron est généralement l'eau (H<sub>2</sub>O). Cela se fait via l'intervention d'une enzyme appelé complexe de photolyse.
- La réaction de photolyse est la suivante:  $2 \text{H}_2\text{O} \rightarrow 4 \text{H}^+ + 4 \text{e}^- + \text{O}_2$



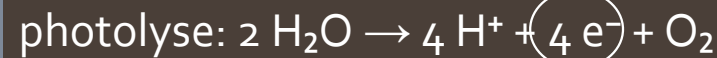
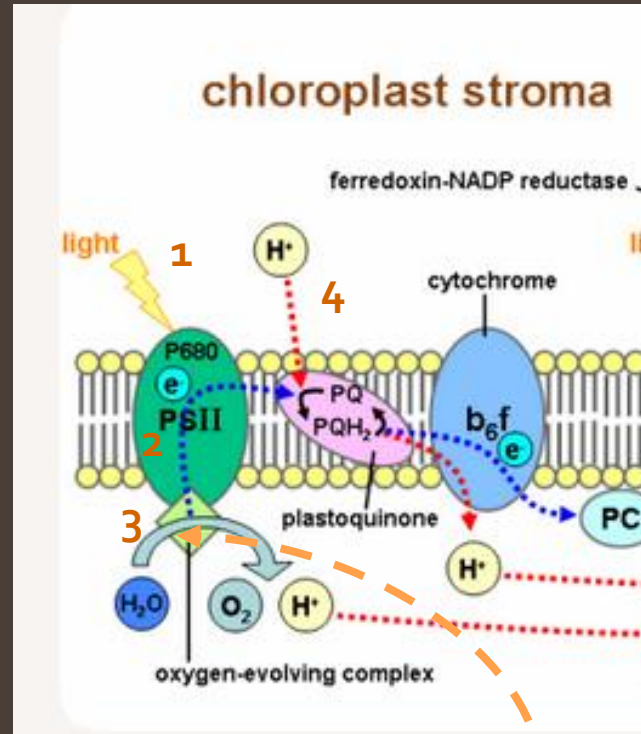
- Différentes méthodes ont permis d'isoler les membranes des thylacoïdes puis de séparer et de caractériser 5 complexes protéiques importants (PSI, PSII, LHC II, Cytb-f et ATPase).
- Ces protéines contiennent pour certaines des pigments

### III. Les protéines de la photosynthèse

Complexe protéique	Région granaires (empilées)	Région agraires/stromatiques	Fonction principale
Photosystème I (PSI)	15–20 %	80–85 %	Capture de lumière, réduction du NADP <sup>+</sup> , contient de la chlorophylle et des caroténoïdes
Photosystème II (PSII)	85 %	15 %	Capture de lumière, photolyse de l'eau, contient de la chlorophylle et des caroténoïdes
Cytochrome b6f	50 %	50 %	Transport d'électrons entre PSII et PSI
LHCII (antenne du PSII)	80–90 %	10–20 %	Capture et transfert d'énergie lumineuse vers PSII. Contient des pigments
ATP synthase	~0 %	~100 %	Synthèse d'ATP grâce au gradient de protons

### III. Les protéines de la photosynthèse

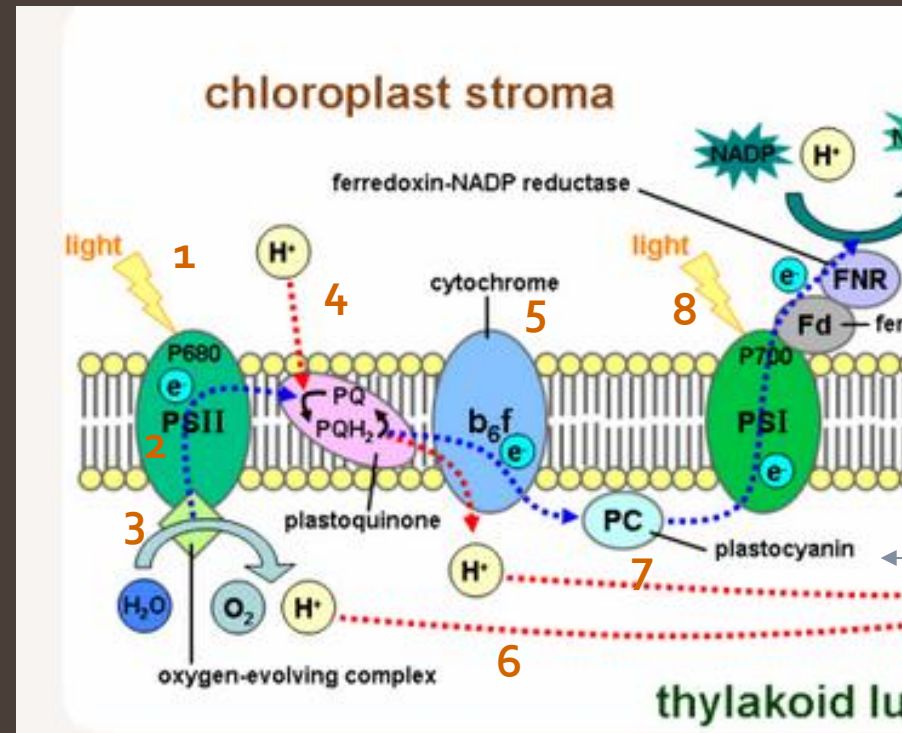
- Agencement de la chaîne de transporteur d'électrons selon les complexes protéiques présent dans le thylakoïde



1: Réception de la lumière par PSII par l'intermédiaire de LHCII; 2 libération d'électrons qui seront transporté vers la phéophytine puis les plastoquinones. Le PSII est chargé +; 3: photolyse de l'eau, production de  $H^+$  et de  $O_2$ . Les électrons retourne au PSII, pour équilibrer les charges; 4: La plastoquinone reçoit des électrons issus de PSII, et devient chargée négativement, elle s'équilibre en important du  $H^+$  de l'extérieur du thylakoïde. Elle donne ensuite ces électrons au cytochrome, et en profite pour incorporer les  $H^+$  qui ne lui sont plus utile, dans l'intérieur du thylacoïde toujours via le cytochrome.

### III. Les protéines de la photosynthèse

- Agencement de la chaîne de transporteur d'électrons selon les complexes protéiques présent dans le thylakoïde

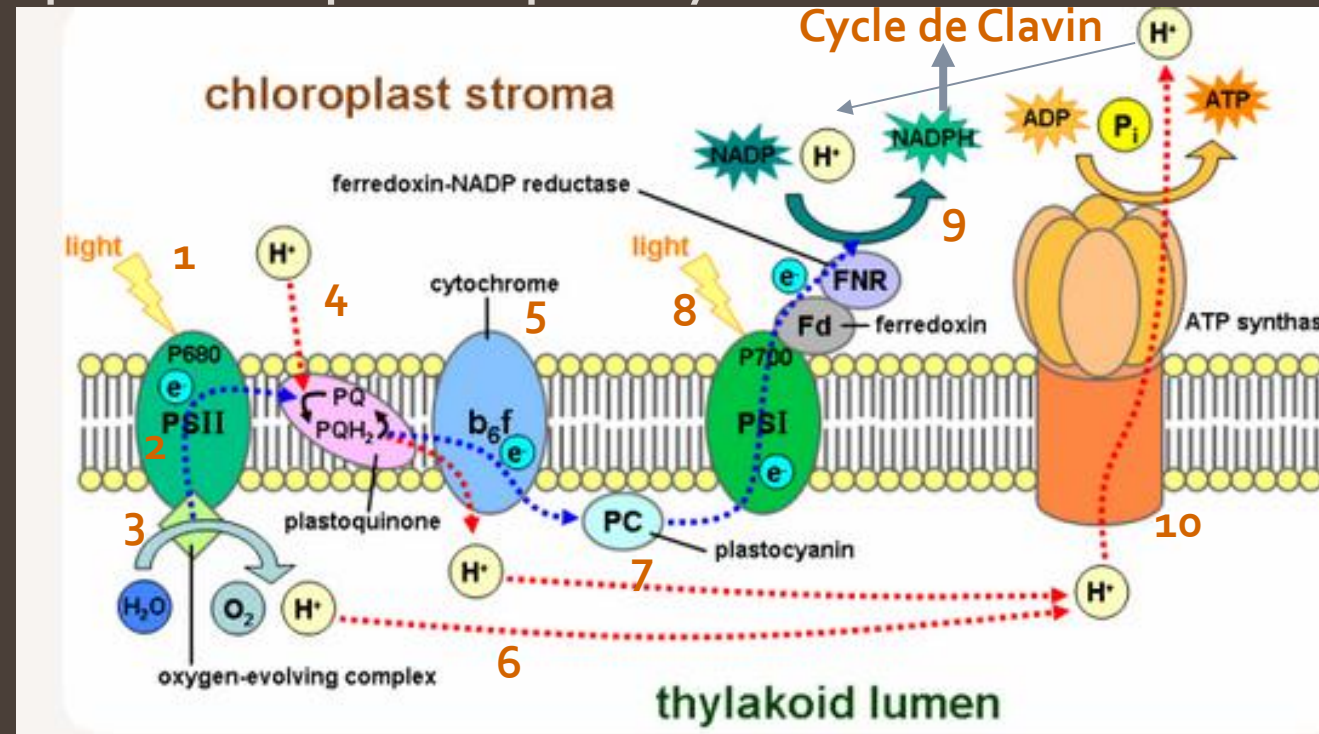


petite protéine qui contient du cuivre qui sert avec le cytochrome de relais entre les photosystèmes I et II

5: le cytochrome envoie les électrons captés vers la plastocyanine, et les H<sup>+</sup> dans le thylakoïde; 6: les H<sup>+</sup> issus de la photolyse de l'eau et du cytochrome, seront envoyé directement vers l'ATP synthase.; 7: la plastocyanine transmet les électrons à PS I; 8: la lumière excite les pigments présent dans PSI, ce qui permet le passage des électrons issus au départ de PSII vers la ferredoxine;

### III. Les protéines de la photosynthèse

- Agencement de la chaîne de transporteur d'électrons selon les complexes protéiques présent dans le thylakoïde. C'est la phase photochimique de la photosynthèse.



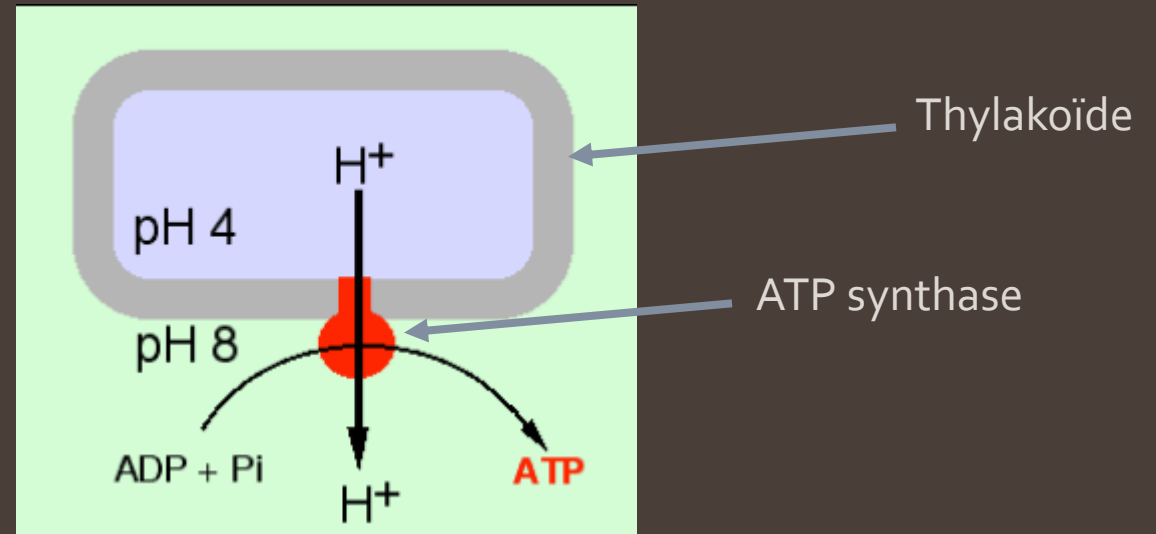
Le H<sup>+</sup> expulsé par l'ATP synthase peut intervenir dans la synthèse du NADPH ensuite

9: la ferredoxine va transmettre 2 électrons à une NADP<sup>+</sup> reductase, qui va créer du NADPH selon cette réaction  $\text{NADP}^+ + 2\text{e}^- + \text{H}^+ \rightarrow \text{NADPH}$ . Le H<sup>+</sup> est présent dans le stroma. Du NADPH est synthétisé, ce sera nécessaire dans le cycle de Calvin;

10: le H<sup>+</sup> de la photolyse et du cytochrome, sert de carburant pour faire tourner une ATP synthase,  $\text{ADP} + \text{P}_i + \text{énergie (gradient de H}^+) \rightarrow \text{ATP} + \text{H}_2\text{O}$ .

### III. Les protéines de la photosynthèse

- La décomposition de  $H_2O$  et l'activité de la plastohydroquinone couplé à celle du cytochrome, créent de pH acide à l'intérieur du thylakoïde, en augmentant la quantité de  $H^+$ .
- Par principe de diffusion, dès lors qu'il y a une ouverture, le milieu le plus concentré en un élément, va se déverser dans le milieu le moins concentré. Comme l'eau qui se déverse à travers la vitre dans un aquarium percé,  $H^+$  va se déverser à l'extérieur du thylakoïde au travers de l'ATP synthase qui sert d'ouverture vers l'extérieur.



## IV. Bilan de réaction

Réaction	Détails
<b>Photolyse de l'eau</b>	2 molécules d'eau donnent <b><math>4e^-</math>, <math>4H^+</math></b> , et <b><math>O_2</math></b>
<b>Transport des électrons (4)</b>	Via pheophytine → plastoquinone → cytochrome b6f → plastocyanine → PSI → ferredoxine → NAD <sup>+</sup> reductase
<b>Pompage de H<sup>+</sup></b>	Le <b>cytochrome b6f</b> pompe environ <b>4 H<sup>+</sup></b> dans le lumen via la plastoquinone
<b>PSI + lumière</b>	Réexcite les électrons → transfert à la ferredoxine
<b>NADP<sup>+</sup> réductase</b>	Utilise <b><math>4e^- + 2 H^+</math> (du stroma) → 2 NADPH</b>
<b>ATP synthase</b>	Utilise le gradient de H <sup>+</sup> pour produire environ <b>1.5 ATP</b>

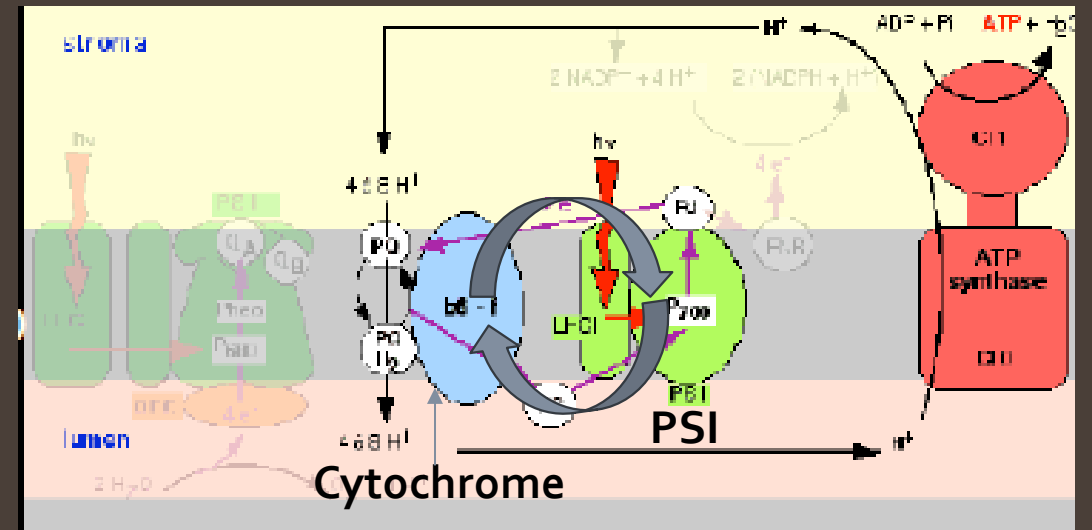
## IV. Bilan de réaction

Produit pour une sollicitation de PSII	Quantité obtenue
<b>NADPH</b>	2 molécules
<b>ATP</b>	~1.5 molécules
<b>O<sub>2</sub></b>	1 molécule
<b>H<sup>+</sup> dans le thylakoïde</b>	~8 protons (4 de l'eau + 4 du cytochrome)

Pour produire du glucose par l'intermédiaire du cycle de Calvin, il faudrait à peut près 12 sollicitations du PSII (12 NADPH)  
Pour une triose phosphate (G<sub>3</sub>P), c'est 6 sollicitations.

## IV. Bilan de réaction

- Dans certain cas, la plante ne cherchera pas à produire du NADPH, parce qu'elle en a trop par exemple. Dans ce cas-ci, PSI n'envoie pas d'électron à la ferredoxine, mais les renvoie vers le cytochrome. Ce qui créer un cycle, tout en maintenant l'incorporation de  $H^+$  dans le thylakoïde (pour créer de l'ATP).



## IV. Bilan de réaction

- Bilan:

-Les photons sont capté par groupe de 2 par les photosystèmes I et II. En fait 1 électrons à besoin de 2 photons pour se faire déplacer.

-Or lors de la photolyse de l'eau on produit 4 électrons, 4 protons/H<sup>+</sup>, du dioxygène et on consomme 2 molécule d'eau :  $2 \text{H}_2\text{O} \rightarrow 4 \text{H}^+ + 4 \text{e}^- + \text{O}_2$ , donc, on a besoin de 8 photons pour les 4 électrons au total.

-La NADP+reductase a besoin de 2 électrons pour produire du NADPH, donc 4 électrons issus de la photolyse équivaut à 2 NADPH produit (4 électrons disponible):  
 $\text{NADP}^+ + 2\text{e}^- + \text{H}^+ \rightarrow \text{NADPH}$

-Pour produire 2 NADPH à partir de la photolyse de 2 molécules d'eau, il faut 8 photons : 4 pour exciter les électrons dans le PSII, et 4 pour les réexciter dans le PSI avant leur transfert à la NADP<sup>+</sup> réductase.

Produits et réactifs	Quantité nécessaire
Molécules d'eau (H <sub>2</sub> O)	2
Électrons transférés	4
Photons absorbés	8 (2 par électron)
NADPH produits	2
O <sub>2</sub> libéré	1

## V. Fixation du CO<sub>2</sub>

- La transformation de l'énergie lumineuse en énergie chimique va induire une autre phase de la photosynthèse, qui va permettre l'assimilation rapide du CO<sub>2</sub> et sa réduction en glucides. C'est **le cycle de Calvin, ou phase biochimique.**

1) Absorption du CO<sub>2</sub> sur RUBP (3 tours, 3 CO<sub>2</sub> fixé)

2) Incorporation du CO<sub>2</sub> dans le métabolisme chloroplastique

3) Synthèse d'une molécule à 3 C (APG)

4) Réduction en triose 3 P (G<sub>3</sub>P)

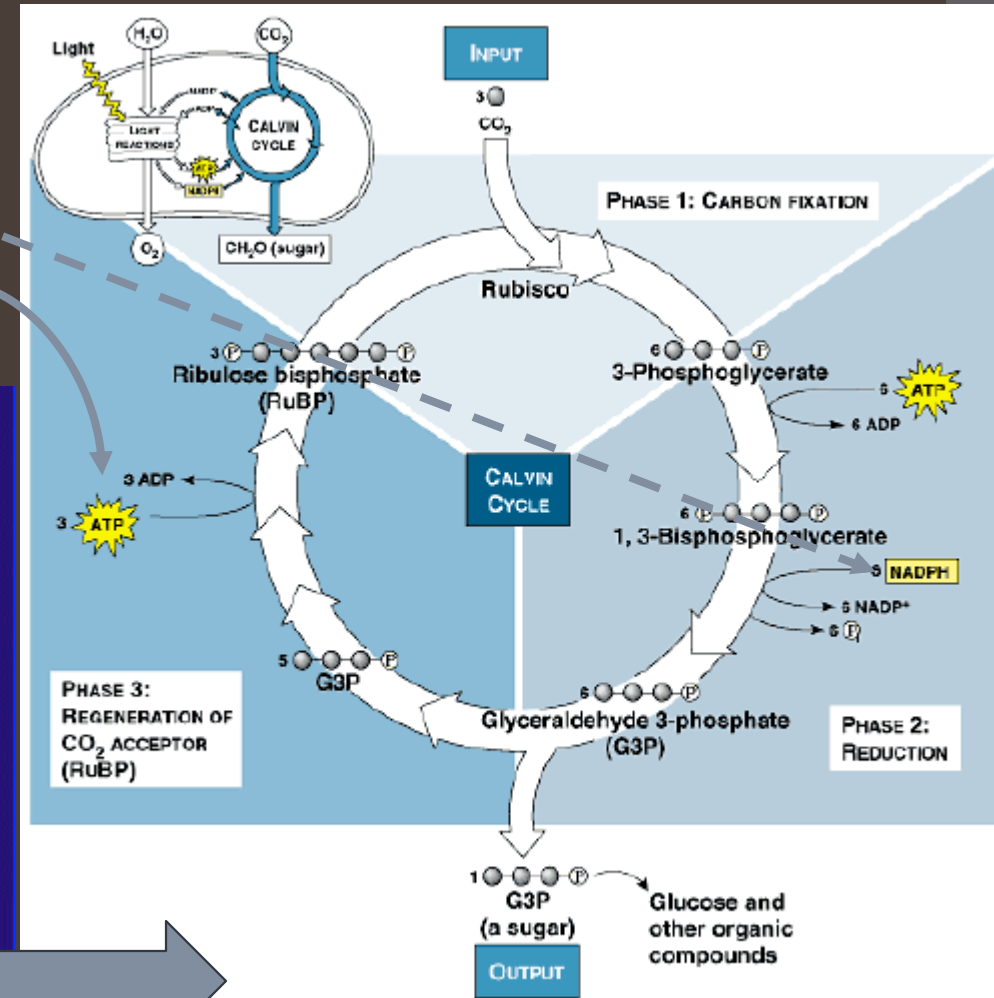
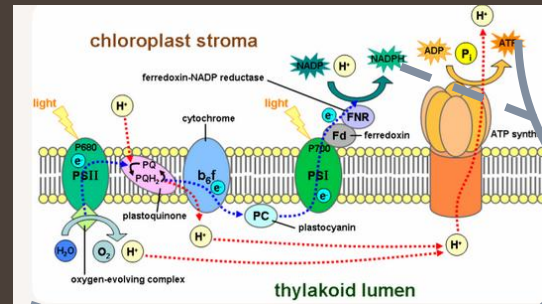


Synthèse de sucre

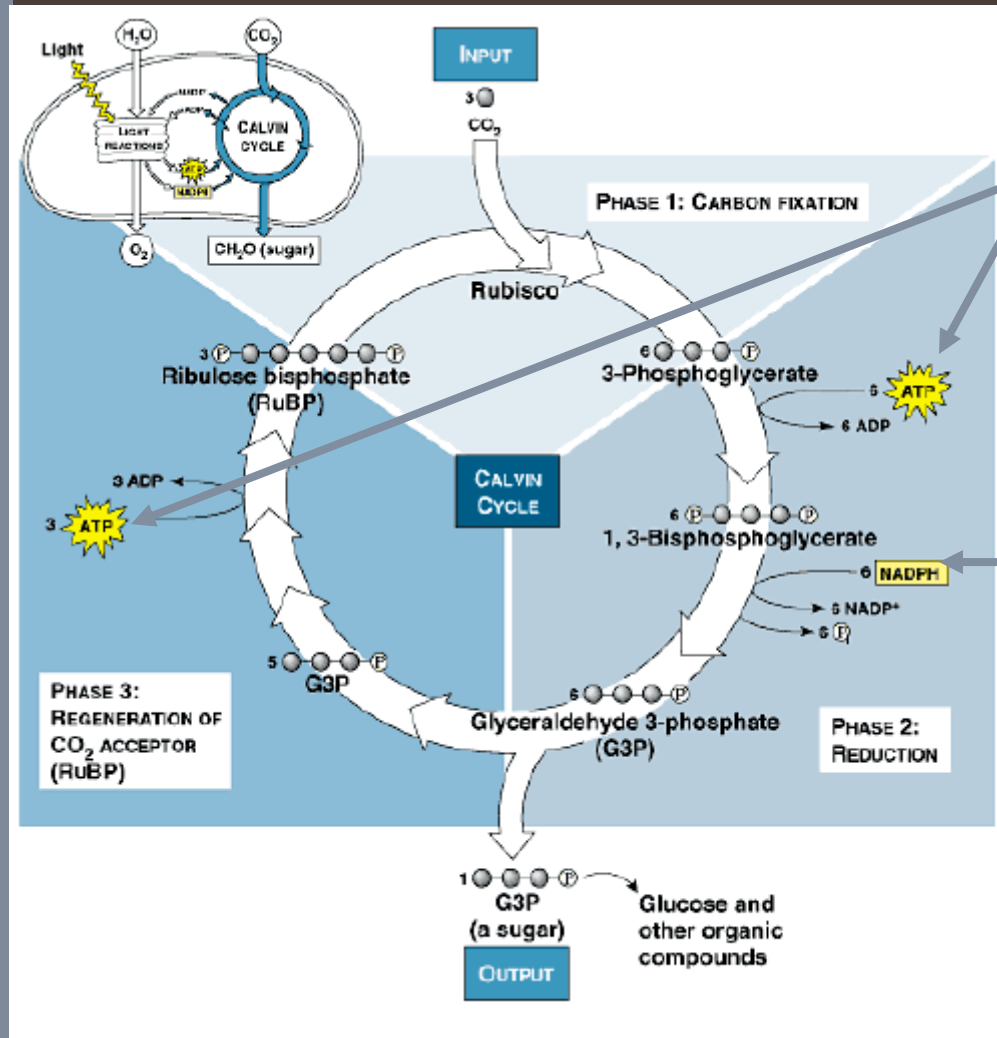
5) Régénération de l'accepteur primaire

# VI. Cycle de Calvin

- Le cycle de Calvin se déroule dans le chloroplaste, à l'extérieur du thylakoïde.
- À vrai dire, les phases photochimiques dans le thylakoïde et le cycle de Calvin sont même couplées



## VI. Cycle de Calvin



- L'ATP utilisé ici provient de l'ATP synthase dans les membranes des thylakoïdes. Il a été fabriqué avec les  $\text{H}^+$  issus de la photolyse de l'eau et incorporé via le cytochrome.

- Le NADPH, quand à lui, est issu de la chaîne de transporteur d'électrons (du PSII à la  $\text{NAD}^+$ reductase) suite à la captation de 8 photons

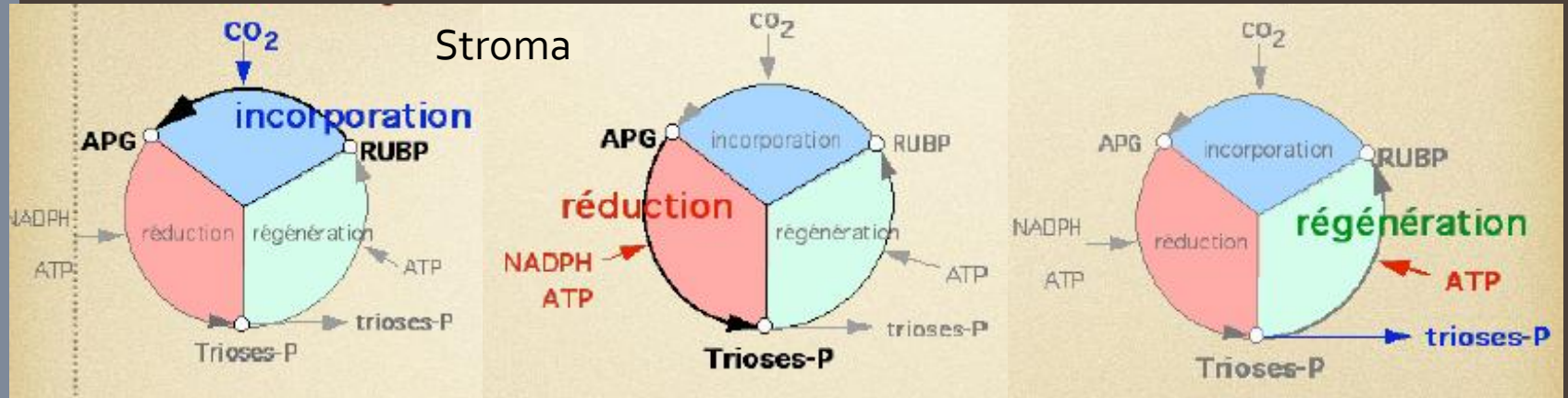
## VI. Cycle de Calvin

- On va pouvoir décrire le Cycle de Calvin en 3 parties:

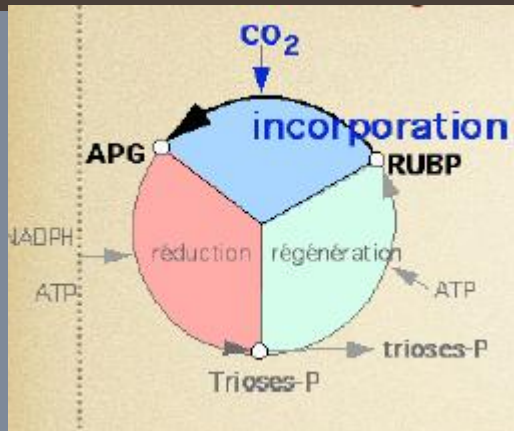
- 1) **l'incorporation du CO<sub>2</sub> via Rubisco** (ribulose-1,5-bisphosphate carboxylase/oxygénase), -> carboxylation+hydrolyse

- 2) **la réduction 3PGA (3-phosphoglycérate) en « triose phosphate »** (glycéraldéhyde-3-phosphate ou G3P) -> phosphorylation+réduction

- 3) **la régénération de La RUBP** (ribulose-1,5-bisphosphate), après fixation de 3 CO<sub>2</sub>, 5 molécules de G3P sur 6 produites, seront régénérées en molécule de RUBP. La 6<sup>ème</sup> restante ne sera pas régénérée, mais servira à la synthèse de sucre



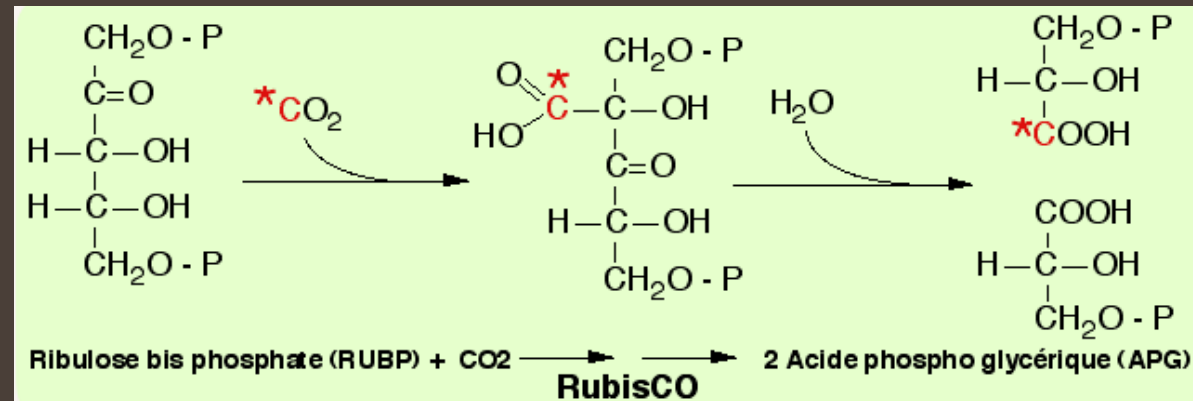
Plusieurs facteurs seront considéré comme « régulateur » dans le cycle de Calvin: notamment le CO<sub>2</sub>, le NADPH, et l'ATP. Il en existe d'autre, comme le RUBP, le fructose, etc...



## VI. Cycle de Calvin

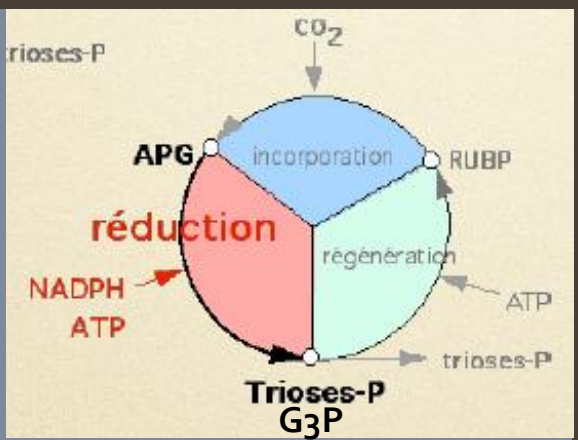
### L'incorporation du CO<sub>2</sub>

- 1) Absorption du CO<sub>2</sub> (3 par tours) dans la molécule de RUBP
- 2) création d'une liaison carboxylique (-COOH) et création d'une molécule instable
- 3) L'enzyme Rubisco va déclencher une hydrolyse, la molécule est cassé en 2 acide phosphoglycérique (APG)



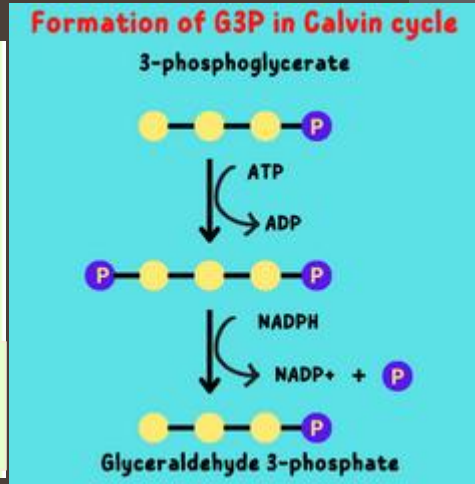
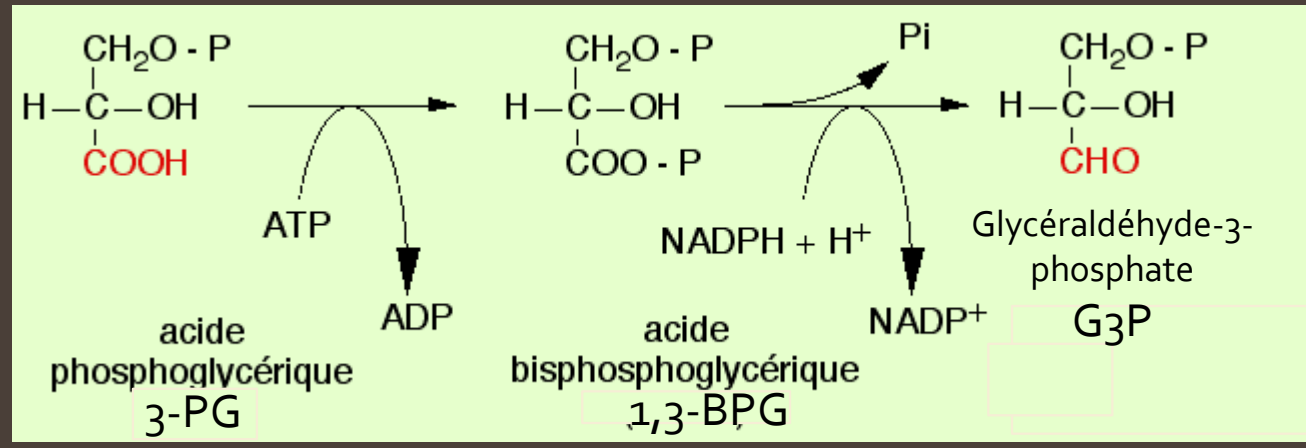
Réactions	Réactif(s)	Enzyme / Cofacteur	Produit(s)
Fixation du CO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub> + Ribulose-1,5-bisphosphate (RUBP)	Rubisco	Molécule instable à 6C
Clivage de la molécule instable (hydrolyse)	Molécule à 6C	H <sub>2</sub> O	2 x acides 3-phosphoglycérique (3-PGA ou APG)

# VI. Cycle de Calvin

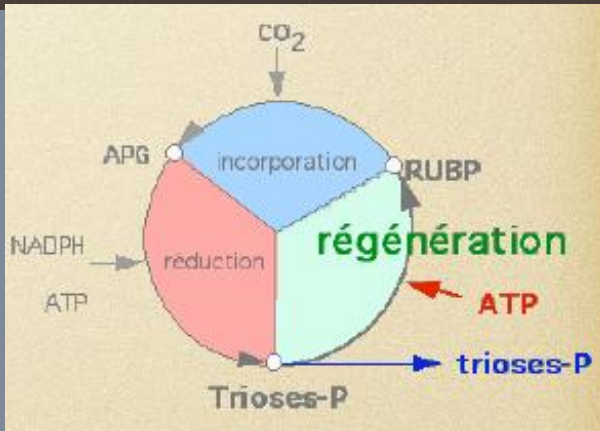


## la réduction 3PGA (3-phosphoglycérate) en G3P

- 1) Un acide phosphoglycérique récupère un phosphate issu d'un ATP.
- 2) création d'un acide biphosphoglycérique (ABPG), qui va récupérer un hydrogène issus d'un NADPH + perte d'un phosphore
- 3) formation du G3P (glycéraldéhyde-3-phosphate)



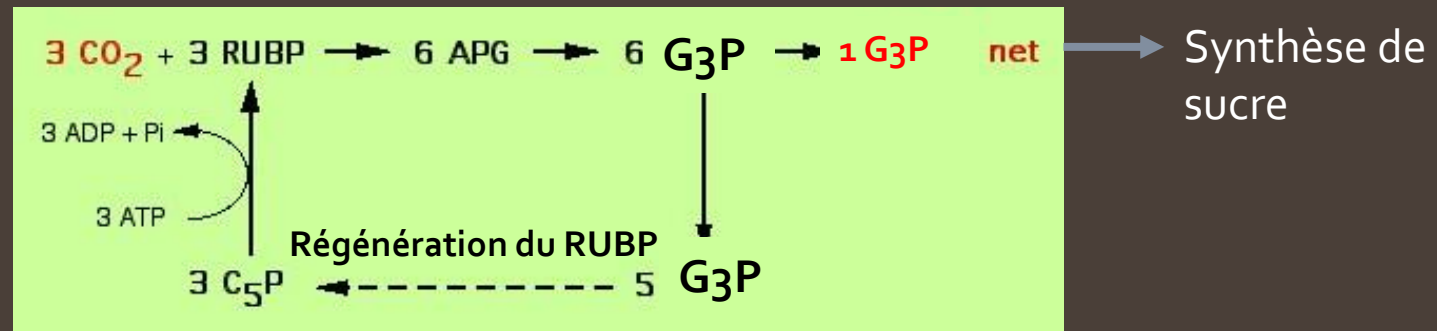
Réactions	Réactif	Cofacteur utilisé	Produit
3PG → 1,3-BPG	3PG	ATP (phosphorylation)	1,3-BPG
1,3-BPG → G3P	1,3-BPG	NADPH (réduction)	G3P

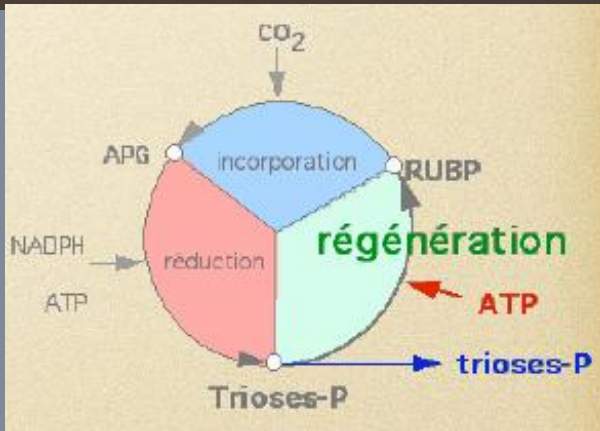


## VI. Cycle de Calvin

### la régénération de La RUBP (ribulose-1,5-bisphosphate)

- 1) Suite à l'incorporation de 3  $\text{CO}_2$  dans 3 molécules de RUBP et d'une hydrolyse, on obtient 6 APG
- 2) Suite à une phosphorylation et une réduction, 6 APG sont converti en 6  $\text{G}_3\text{P}$ .
- 3) 1  $\text{G}_3\text{P}$  sera utilisé dans la synthèse de sucre. Les 5 autres, seront converti en 3 pentoses phosphates ( $\text{C}_5\text{P}$ )
- 4) La phosphorylation des 3 pentoses phosphates, va permettre la régénération du RUBP (utilisation d'ATP)



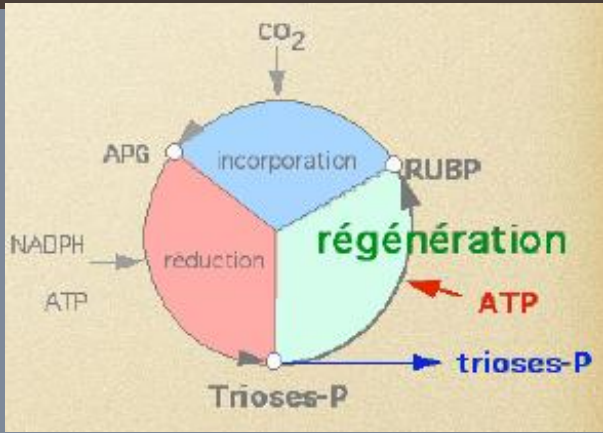


## VI. Cycle de Calvin

### la régénération de La RUBP (ribulose-1,5-bisphosphate)

- 1) Suite à l'incorporation de 3 CO<sub>2</sub> dans 3 molécules de RUBP et d'une hydrolyse, on obtient 6 APG
- 2) Suite à une phosphorylation et une réduction, 6 APG sont converti en 6 G<sub>3</sub>P.
- 3) 1 G<sub>3</sub>P sera utilisé dans la synthèse de sucre. Les 5 autres, seront converti en 3 pentoses phosphates (C<sub>5</sub>P)
- 4) La phosphorylation des 3 pentoses phosphates, va permettre la régénération du RUBP (utilisation d'ATP)

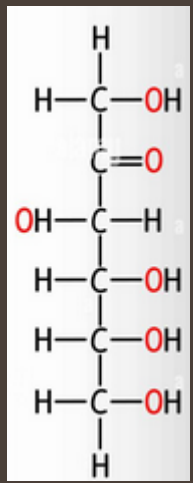
Réactions	Réactif	Cofacteur utilisé	Produit
5G <sub>3</sub> P → 3C <sub>5</sub> P	5G <sub>3</sub> P	fructose (C <sub>6</sub> ), l'érythrose (C <sub>4</sub> ) et le sédoheptulose (C <sub>7</sub> ), +enzyme	3C <sub>5</sub> P
3C <sub>5</sub> P → 3RUBP	3C <sub>5</sub> P	3ATP + 2NADH	3RUBP



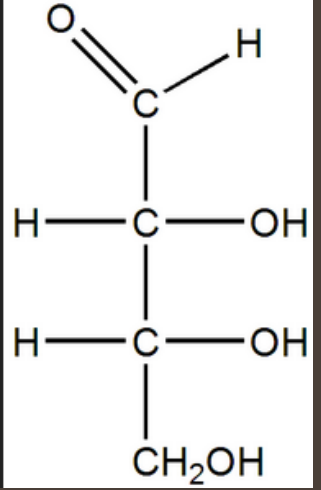
### la régénération de La RUBP (ribulose-1,5-bisphosphate) [Remarque]

- La conversion des 5 G3P en 3 pentoses phosphates ne se fait pas directement. Cela nécessite en amont l'intervention de divers sucre, dont le fructose (C<sub>6</sub>), l'érythrose (C<sub>4</sub>) et le sédoheptulose (C<sub>7</sub>), via des transfert de carbone, de l'isomérisation et de l'épimérisation.

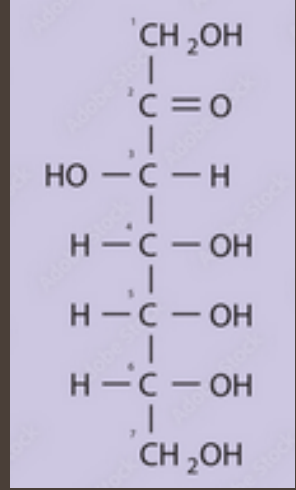
## VI. Cycle de Calvin



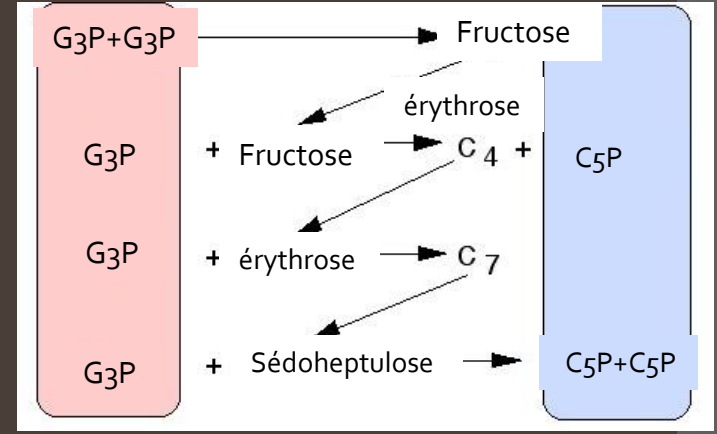
Fructose (C<sub>6</sub>)



Érythrose (C<sub>4</sub>)



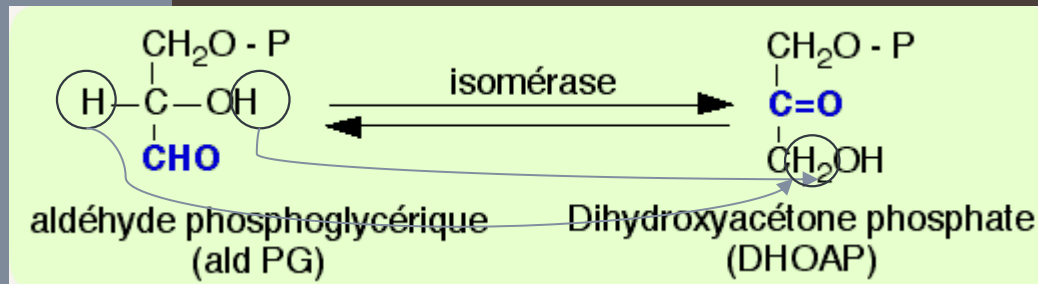
Sédoheptulose (C<sub>7</sub>)



# Remarque

## Isomérisation

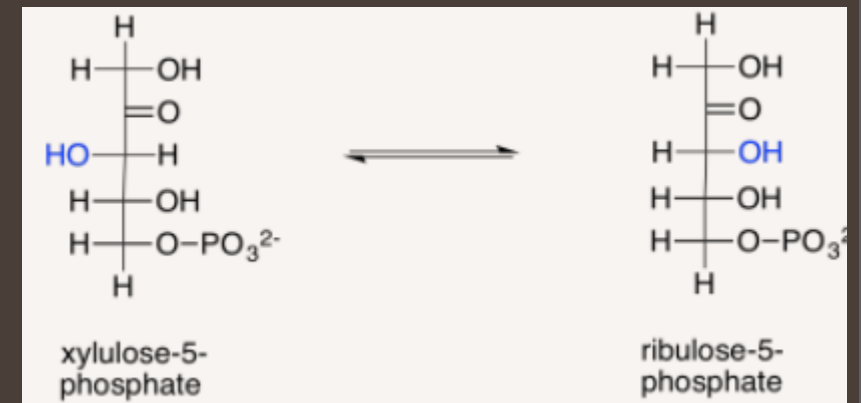
- Transformation d'une molécule en une autre **ayant la même formule chimique**, mais une **structure différente**.

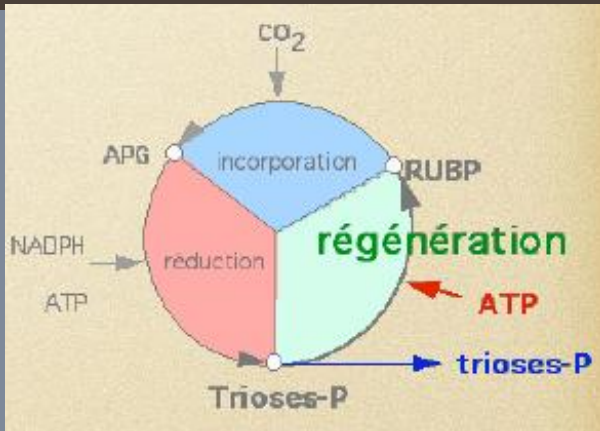


\*Voir  
exercice

## Epimérisation

- Changement de la configuration autour d'un **seul carbone asymétrique**





## VI. Cycle de Calvin

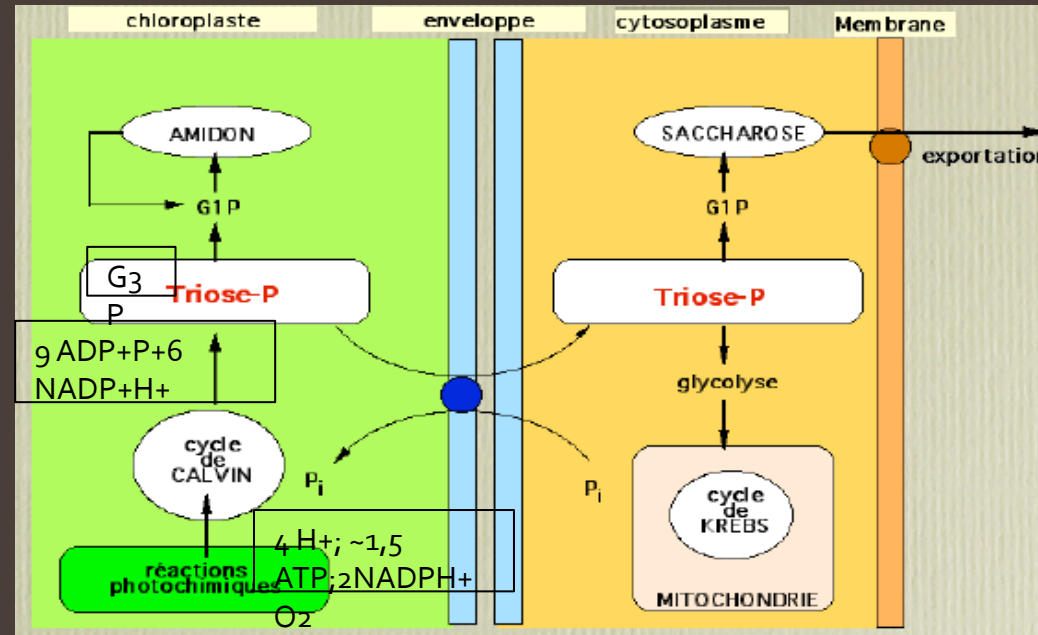
### la régénération de La RUBP (ribulose-1,5-bisphosphate)

- La régénération du Rubilose 1,5 bisphosphate (\*3) nécessaire à l'ensemble du cycle nécessite 3 ATP et 2 NADPH
- La réduction de 1 APG en 1 G<sub>3</sub>P nécessite 1 NADPH et 1 ATP.
- La régénération de 1 RUBP à partir de 1 C<sub>5</sub>P nécessite 1 ATP.

Processus	Réactif(s)	Produit(s)	Énergie / Cofacteur requis
Réduction de 1 APG en 1 G <sub>3</sub> P	1 × 3-APG	1 × G <sub>3</sub> P	1 ATP + 1 NADPH
Régénération de 1 RUBP à partir de 1 C <sub>5</sub> P	1 × Ribulose-5-phosphate (pentose phosphate, C <sub>5</sub> P)	1 × Ribulose-1,5-bisphosphate	1 ATP
Régénération globale du RUBP (1 cycle)	Intermédiaires du cycle (1 CO <sub>2</sub> )	1 RUBP	3 ATP + 2 NADPH
Bilan pour obtenir 1 G <sub>3</sub> P: 3 tours	3 CO <sub>2</sub>	G <sub>3</sub> P+3RUBP	9 ATP + 6 NADH

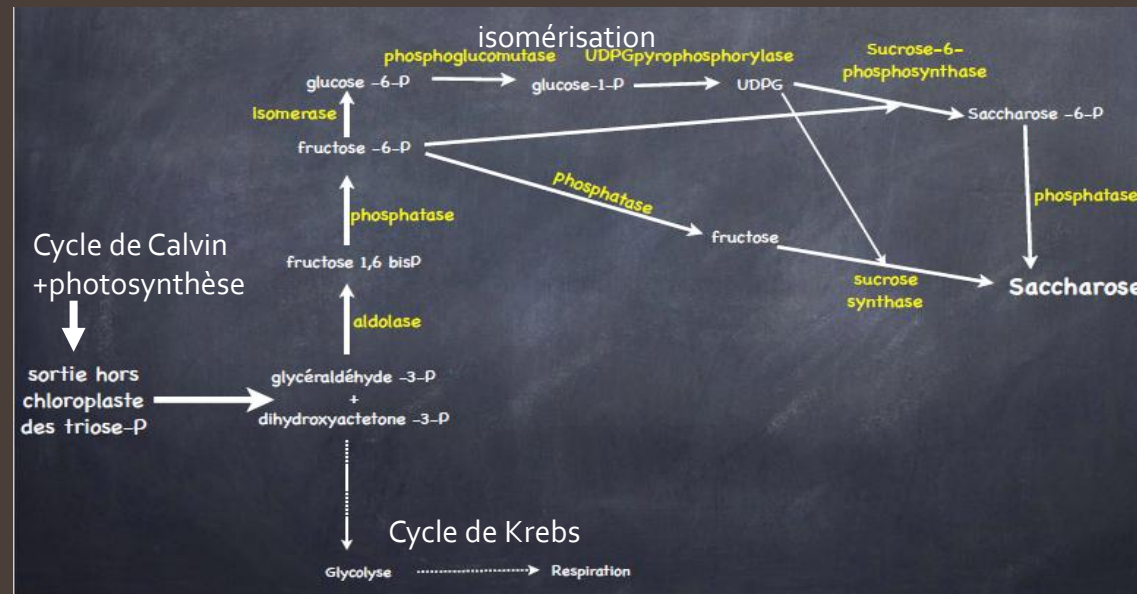
## VII. Voie de régulation et de contrôle

- La photosynthèse, notamment à travers sa phase biochimique (le cycle de Calvin), exerce un rôle de régulation sur d'autres voies de métabolisation des sucres, telles que la formation du saccharose, la glycolyse, et, de manière indirecte, sur d'autres réactions biochimiques comme le cycle de Krebs dans la mitochondrie (respiration cellulaire)
- Les trioses-phosphate (G<sub>3</sub>P), produits dans le stroma du chloroplaste, constituent un carrefour métabolique essentiel. Leur exportation vers le cytosol dépend d'un transporteur de type antiport (P<sub>i</sub>/triose-P), dont l'activité est elle-même régulée par la concentration en phosphate inorganique (P<sub>i</sub>). Ce mécanisme conditionne la synthèse du saccharose et influence, en retour, l'efficacité du cycle de Calvin. Ainsi, les G<sub>3</sub>P assurent une interface dynamique entre les différentes voies biochimiques et participent activement à la régulation de l'activité photosynthétique.



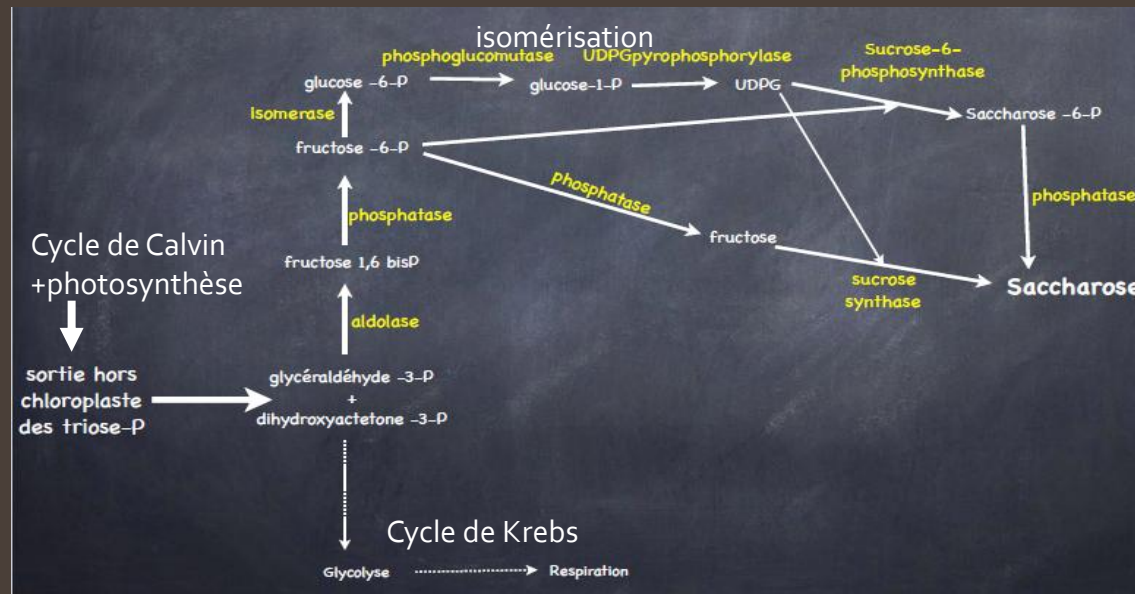
## VII. Voie de régulation et de contrôle

- Une fois dans le cytoplasme, les molécules de triose-phosphate (G<sub>3</sub>P) peuvent être rapidement utilisées pour la synthèse de saccharose, glucide hydrosoluble majoritairement rencontré chez les végétaux et facilement transféré de cellule en cellule. Nous verrons ensuite que le saccharose peut servir de régulateur aussi.
- La production d'une molécule de saccharose (C<sub>12</sub>H<sub>22</sub>O<sub>11</sub>) nécessite la fixation de 12 molécules de CO<sub>2</sub>, soit 12 tours du cycle de Calvin — ou, autrement dit, 4 séries de 3 tours, chaque série permettant la formation d'un G<sub>3</sub>P net utilisable. En effet, sur les 24 molécules de G<sub>3</sub>P produites au total, seules 4 sont disponibles pour la synthèse du saccharose, les autres étant recyclées pour régénérer le ribulose-1,5-bisphosphate. L'export de ces 4 trioses-phosphate hors du chloroplaste s'accompagne de l'entrée de 4 ions phosphate (36 Pi nécessaires pour 12 cycles).



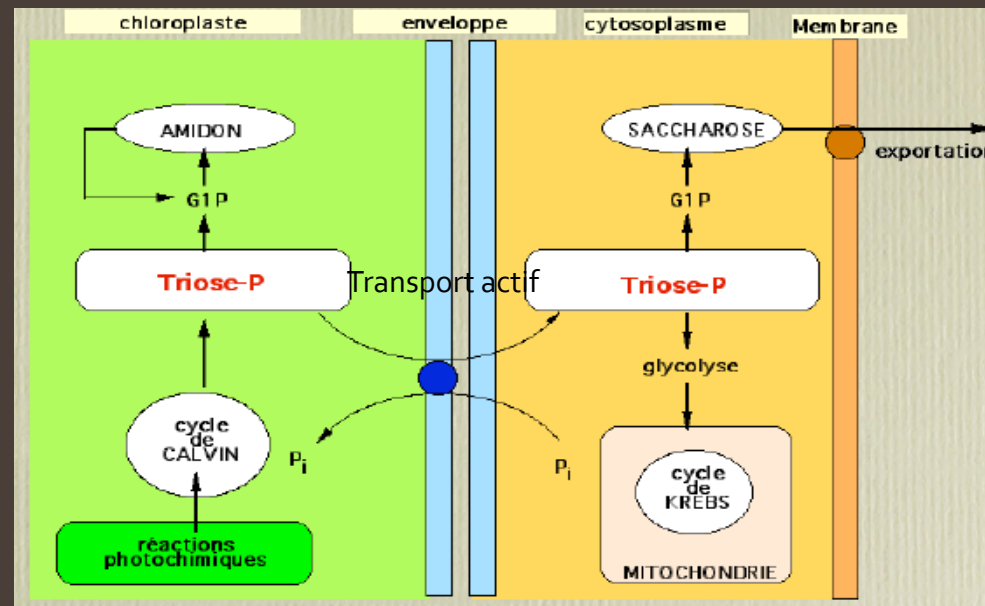
- Si la concentration du saccharose est trop élevée, par rétrocontrôle sa propre synthèse va être inhiber.
- Il y a alors ralentissement voire blocage de l'exportation des molécules de G<sub>3</sub>P, qui restent dans le stroma, où l'élévation de leur concentration, active **la synthèse de l'amidon** (avec pour intermédiaires du fructose-1,6biP, du fructose-6-P, du glucose-6-P). C'est ce qu'il se passe quand il y a beaucoup d'ensoleillement.
- La formation d'amidon va consommer de l'ATP, et donc générer de l'ADP+P dans le stroma, qui s'associeront plus tard avec l'ATPsynthase de la membrane du thylakoïde. Ainsi, une forme d'équilibre est maintenue, concernant le stock d'ADP et de P.

## VII. Voie de régulation et de contrôle



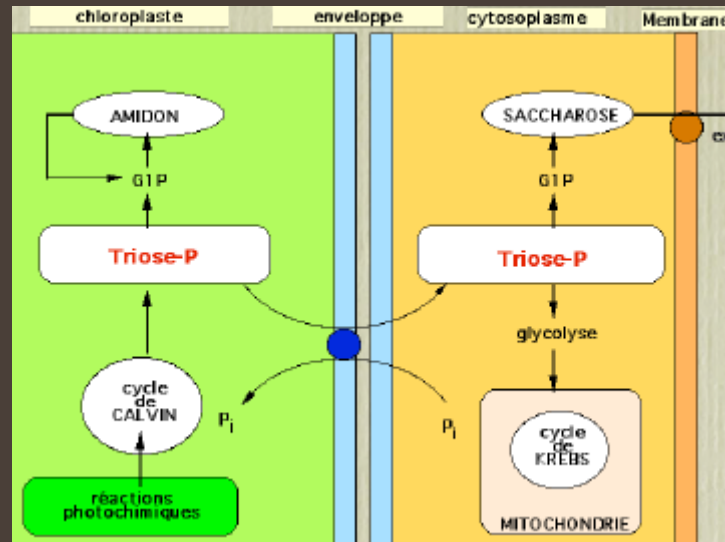
## VII. Voie de régulation et de contrôle

- La synthèse des trioses phosphate (G<sub>3</sub>P) est dépendante de la teneur en phosphate organique dans le stroma.
- Si la concentration du P<sub>i</sub> est trop basse dans le cytoplasme, il y a arrêt de l'exportation des triose-phosphate. Par contre, si cette concentration est forte, il y a exportation des triose-phosphate, mais ceci jusqu'à l'établissement d'un certain équilibre métabolique entre synthèse du saccharose, celle de l'amidon et la régénération du RUBP.
- Les transporteurs actifs protéiques peuvent réguler indirectement en retour l'activité des trioses phosphate (export pour la glycolyse, respiration ou devenir du saccharose, ou bien, transformation en amidon)



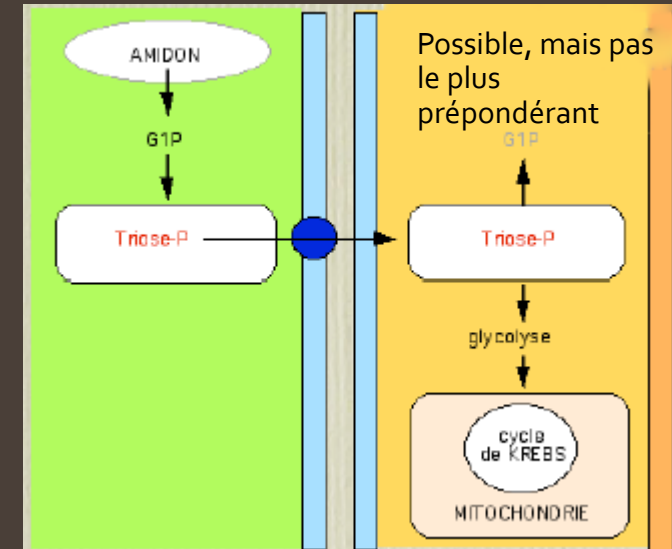
## VIII. Conclusion

### Plante en lumière continue



L'apport constant de photon (lumière) permet au photosystème d'acheminer des électrons pour la synthèse du NADH tandis que la photolyse de l'eau apporte du  $H^+$  pour faire fonctionner une ATP synthase. Le cycle de Calvin est alimenté. La production de triose phosphate est quasi continue tous les 3 tours de cycle. On peut se permettre d'en exporter, et selon les besoins on peut aussi en stocker sous forme d'amidon.

### Plante à l'obscurité



L'apport de lumière n'est plus là. La phase photochimique ne fournit plus l'ATP et le NADH en continu, la plante doit s'appuyer sur d'autres réserves et d'autres réactions biochimiques. L'amidon chloroplastique est donc converti en triose et exporté vers le cytoplasme, où on synthétisera du glucose et ou, on alimentera le cycle de Krebs.

## VIII. Conclusion

### Alternance entre lumière et obscurité

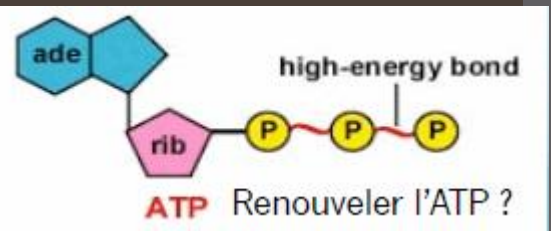
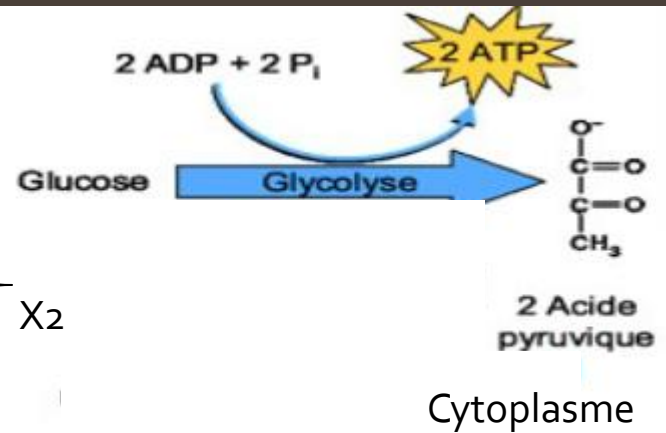
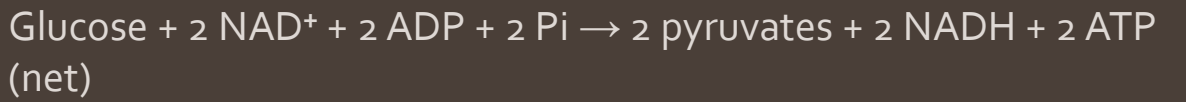
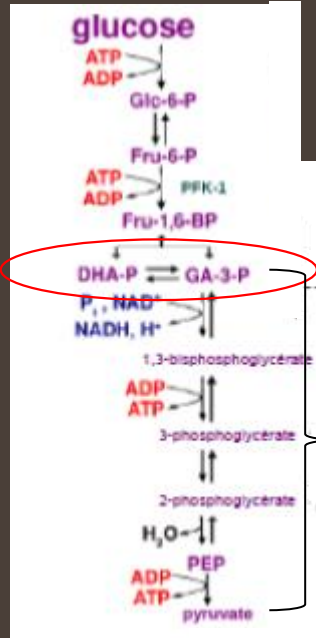
- La photosynthèse de jour, centrée sur le cycle de Calvin, permet la fixation du  $\text{CO}_2$  et la production de trioses-phosphate. Ces molécules alimentent la synthèse de saccharose et d'amidon, tout en interagissant avec les voies énergétiques comme la glycolyse et la respiration.
- Mais lorsque la nuit tombe, la plante mobilise ses réserves d'amidon pour maintenir son métabolisme via la glycolyse et le cycle de Krebs, assurant ainsi une respiration cellulaire active. Chez certaines plantes dites CAM ou  $\text{C}_4$ , l'absorption du  $\text{CO}_2$  peut même se faire la nuit (adaptation à la chaleur).
- Ainsi, le métabolisme végétal s'organise entre les phases lumineuses et obscures, où chaque voie biochimique joue un rôle pour assurer la croissance, et la survie la survie dans le milieu.

# Sommaire

- [I. La glycolyse et la respiration](#)
- [II. La respiration](#)
- [III. La mitochondrie](#)
- [IV. Le cycle de Krebs](#)
- [V. La chaine respiratoire](#)
- [VI. Conclusion](#)
- [VII. Exercice](#)

# I. La glycolyse et la respiration

- La respiration à toujours associée à la production d'énergie chez les être vivants et nous même le constatons lors de la pratique d'un effort physique. La plante aussi respire, et va utiliser cette énergie associée à la respiration.
- Ce phénomène qui utilise le O<sub>2</sub>, et le transforme en CO<sub>2</sub> se passe en partie au niveau cellulaire. Notamment dans la mitochondrie.
- Il existe bien sur d'autre mécanisme capable de fournir de l'énergie, dont certain sont en amont de la respiration, on peut notamment citer la glycolyse:

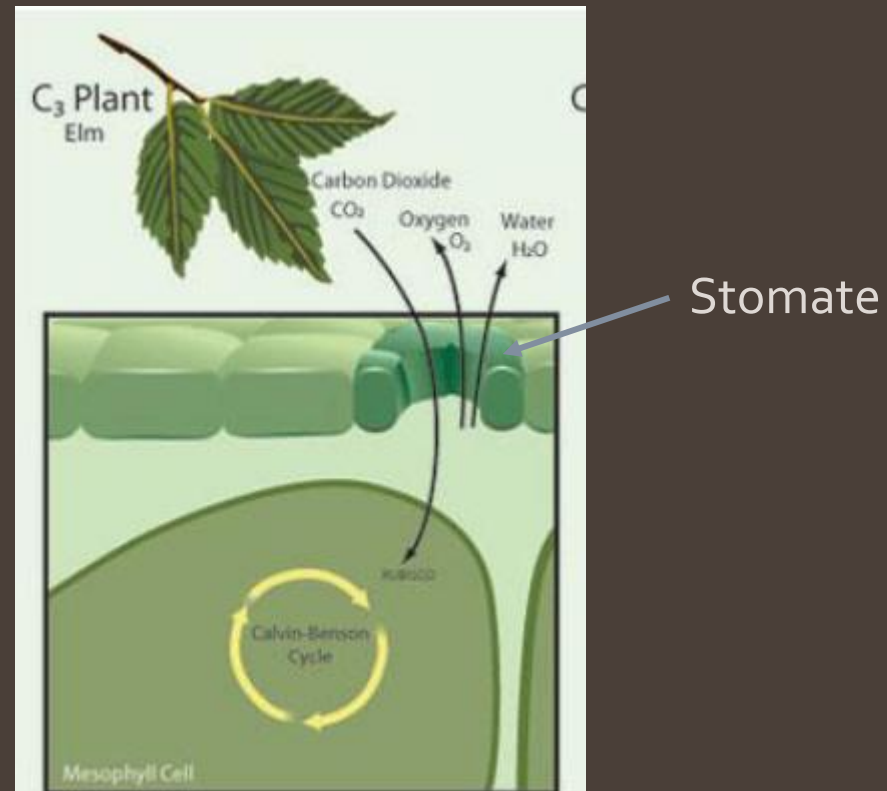


-> mitochondrie

\* Le DHAP sera convertit par la suite en GA-3P, ce qui donnera un pyruvate supplémentaire

## II. La respiration

- La respiration chez les plantes se fait à travers des ouvertures naturelles, que sont les stomates, les lenticelles (sur les racines et les tiges), en général.



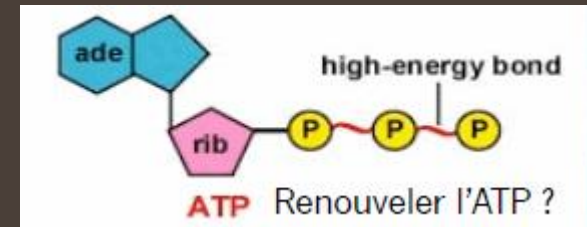
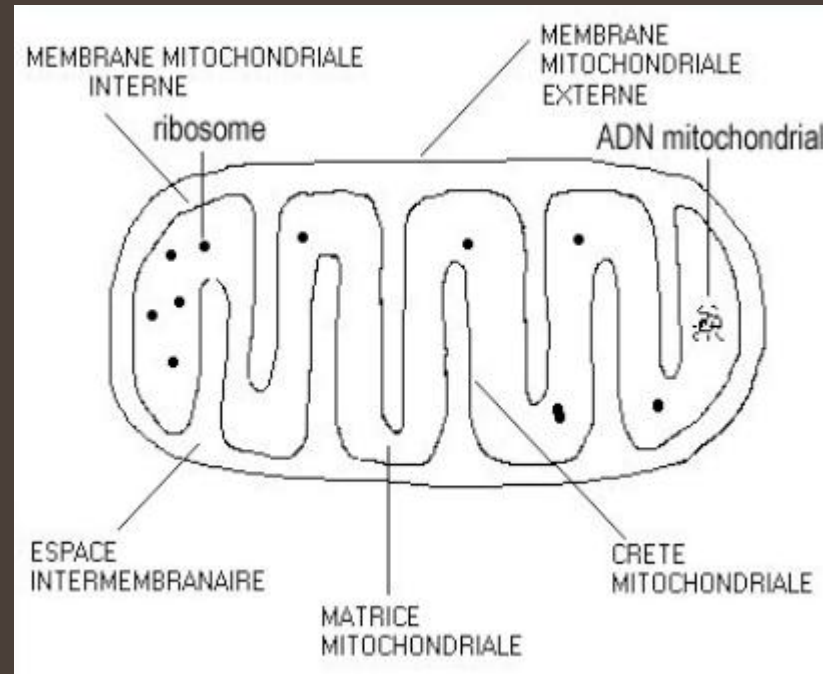
## II. La respiration

En plus des ouvertures naturelles, la plante dispose de 3 autres stratégies pour récupérer de l'oxygène:

- La diffusion passive, même si les stomates sont fermés, l' $O_2$  (très peu) peut passer à travers les cuticules.
- L' $O_2$  peut être stocké dans les tissus de la plante, sous forme dissoute
- L' $O_2$  produit lors de la photosynthèse (à l'intérieur du thylakoïde lors de la photolyse de l'eau) peut être réutiliser pour la respiration

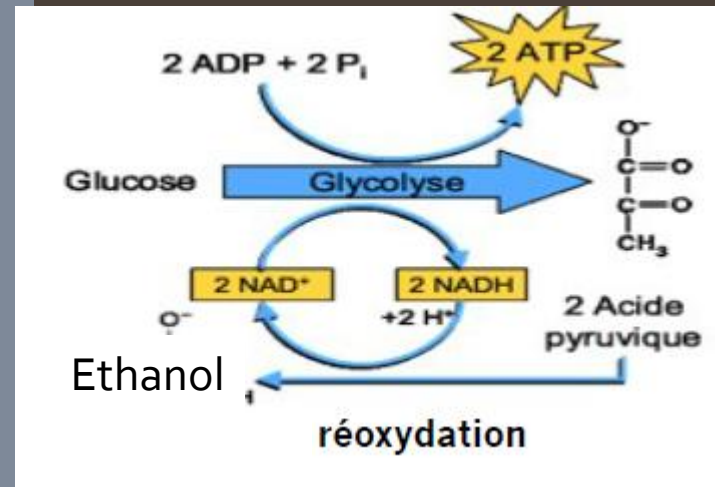
### III. La mitochondrie

- La mitochondrie est un organe présent c'est animaux comme les plantes. On en retrouve souvent dans les lieux de la cellule qui auront besoin d'ATP. C'est aussi accessoirement l'endroit de la respiration au niveau cellulaire.
- On remarque la mitochondrie à sa membrane interne qui fait des plis et des crête. Tout comme la membrane du thylakoïde lors de la photosynthèse, la membrane interne de la mitochondrie sera le lieu d'une chaîne de transport des électrons .

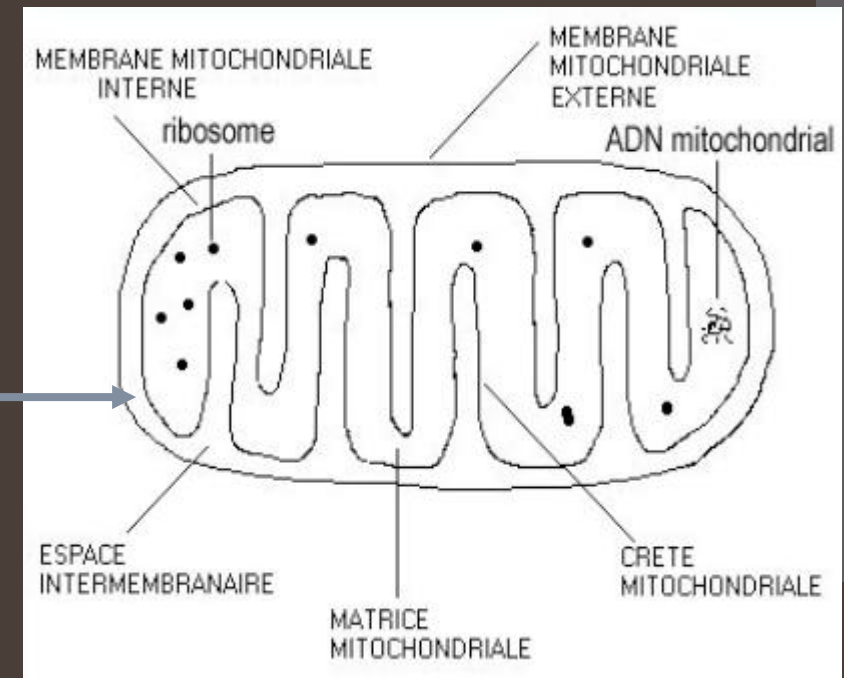


## IV. Cycle de Krebs

- En condition aérobie le pyruvate issu de la glycolyse va être envoyé dans la mitochondrie (on crée de l'énergie pour faire de l'énergie via la respiration).
- En condition anaérobie, il sera converti en éthanol (chez la plante)

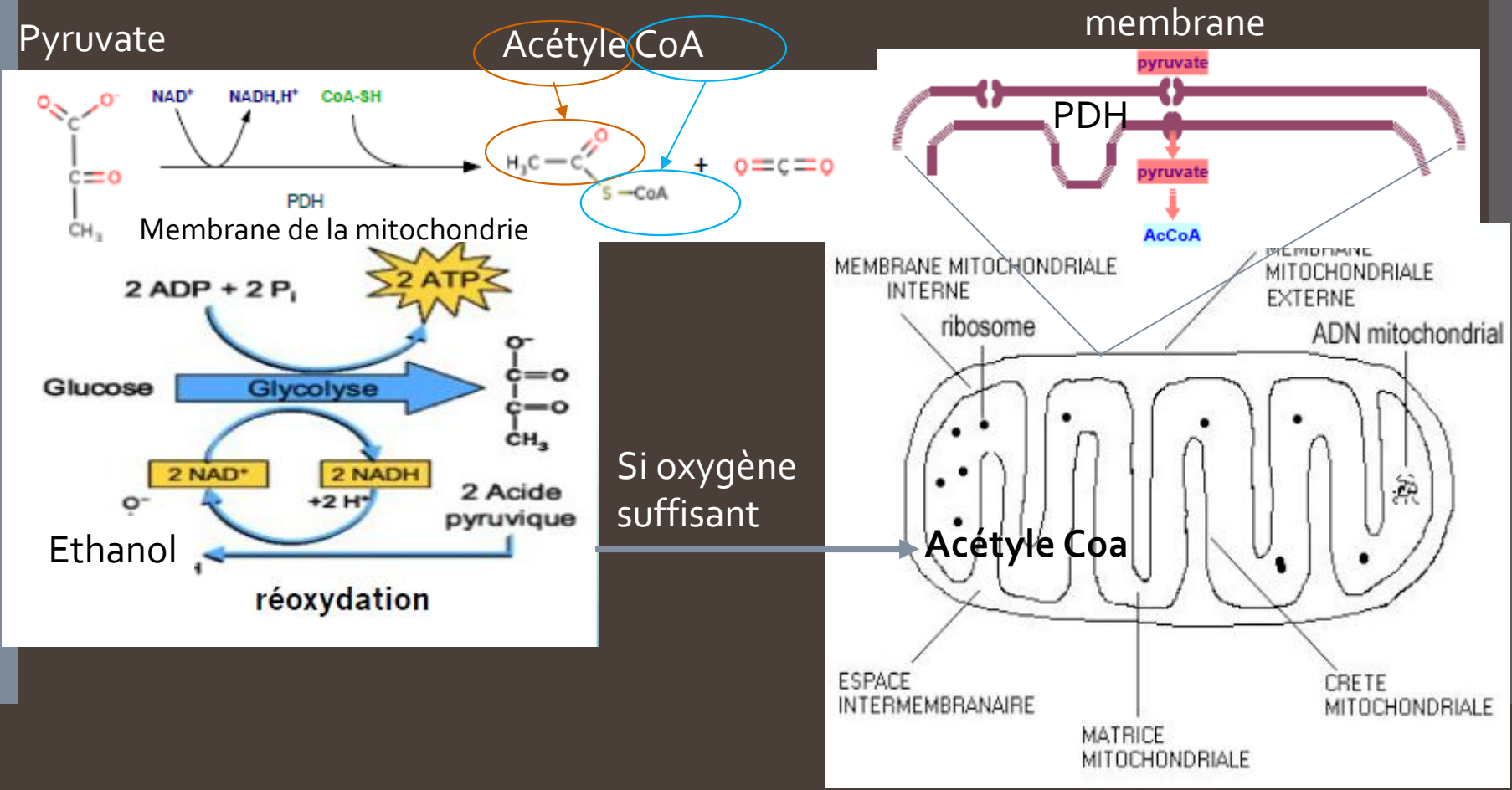


Si oxygène suffisant



# IV. Cycle de Krebs

- Le pyruvate ou acide pyruvique va être décarboxylé par une enzyme (PDH) (on enlève le groupe H-O-C=O), former un groupe acétyle et se verra additionner un groupe chimique appelé coenzyme A (CoA).



## IV. Cycle de Krebs

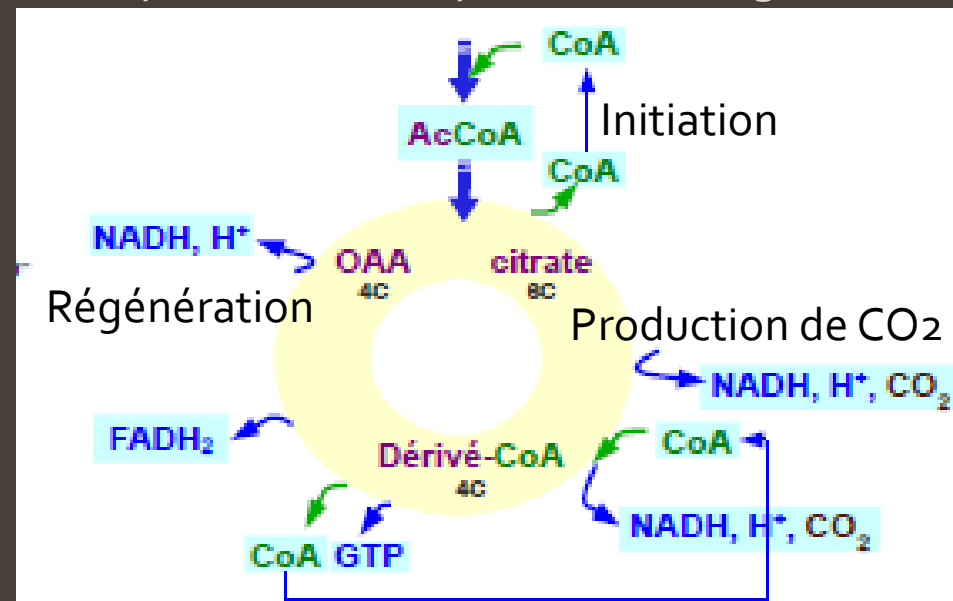
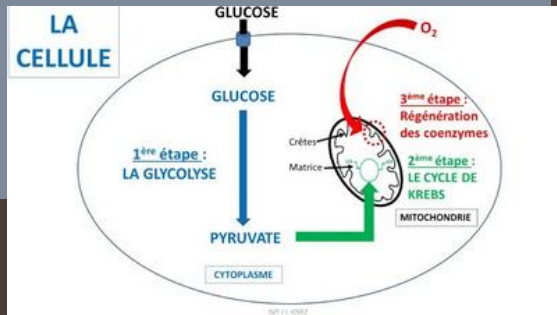
- Le pyruvate transformé en acétyle Coa, va pénétrer la mitochondrie. Il va permettre de démarrer le cycle Krebs, nécessaire à la métabolisation de l'oxygène.
- 3 voies possibles existent pour créer de l'acétyle Coa:
  - la glycolyse,
  - la transformation de certains acides aminés (leucine, lysine)
  - les acides gras, suite à une oxydation spécifique

## IV. Cycle de Krebs

- Le cycle de Krebs va se dérouler dans l'intérieur de la mitochondrie (matrice mitochondriale). Il permet l'oxydation complète des groupements acétyles issus de l'acétyl-CoA et donc la synthèse d'ATP. On peut découper ce cycle en 3 parties:

- 1) Initiation: Le pyruvate est transformé en Acétyl-CoA dans la membrane de la mitochondrie
- 2) Production de CO<sub>2</sub>: Le citrate est oxydé et forme du NADH et du CO<sub>2</sub>, un groupe CoA est réintégré dans le cycle et cela provoque encore la production de CO<sub>2</sub>
- 3) Régénération de l'oxaloacétate: Une fois le groupe CoA éjecté, via des oxydations successives menant à la synthèse de FADH et NADH, l'oxaloacétate, accepteur de l'acétyl CoA est régénéré.

<https://www.youtube.com/watch?v=p-Jsoeonozs>



# IV. Cycle de Krebs

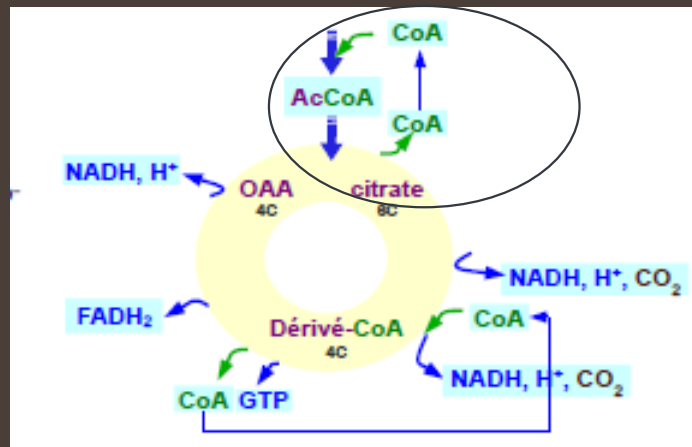
## 1) Initiation:

L'oxaloacétate (4 carbones) se combine avec l'acétyl-CoA (2 carbones) pour former le citrate (6 carbones) par l'intermédiaire de la citrate synthase:

Citrate synthase



Le groupe CoA est libéré du cycle de Krebs



# IV. Cycle de Krebs

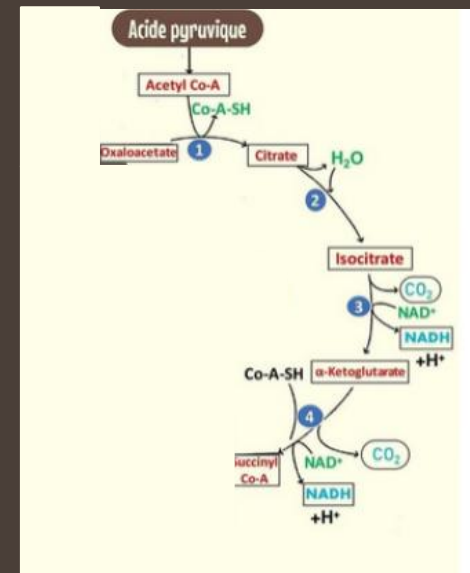
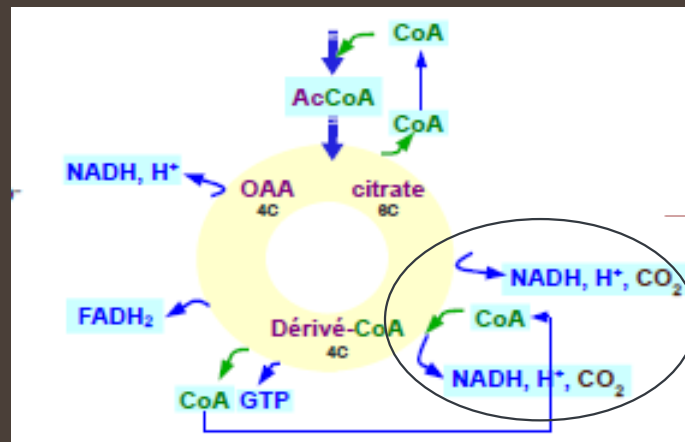
## 2) Production de CO<sub>2</sub>

Le citrate est transformé en isocitrate, puis en α-cétoglutarate, et enfin en succinyl-CoA. Il y a production de 2CO<sub>2</sub> dans le processus et synthèse de 2 NADH

1) Citrate (6C) → Isocitrate (6C)

2) Isocitrate (6C) + NAD<sup>+</sup> → α-Cétoglutarate (5C) + CO<sub>2</sub> + NADH

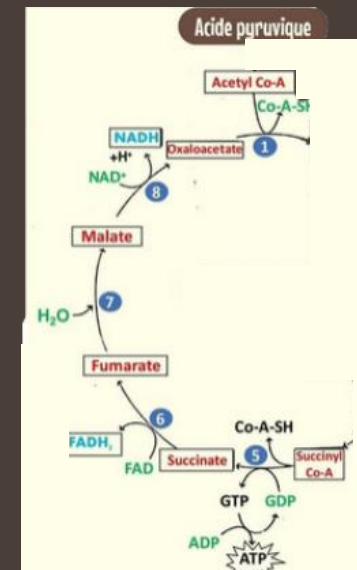
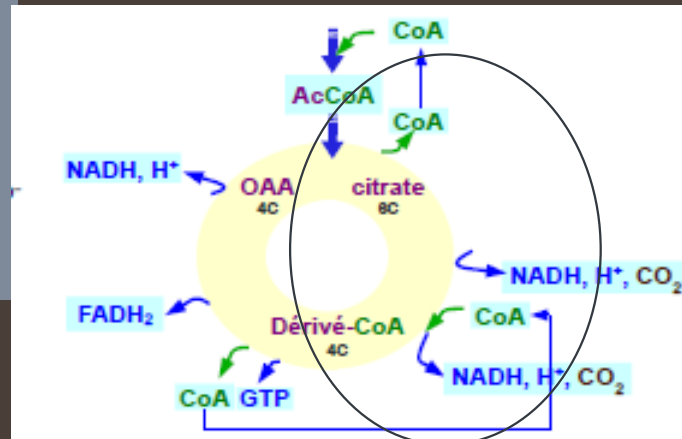
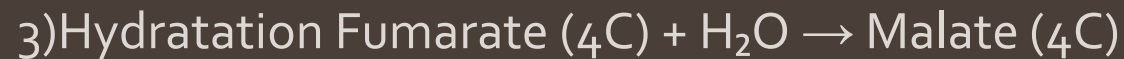
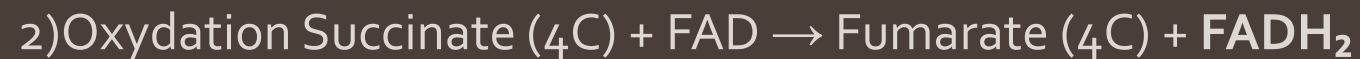
3) α-Cétoglutarate (5C) + NAD<sup>+</sup> + CoA → Succinyl-CoA (4C) + CO<sub>2</sub> + NADH



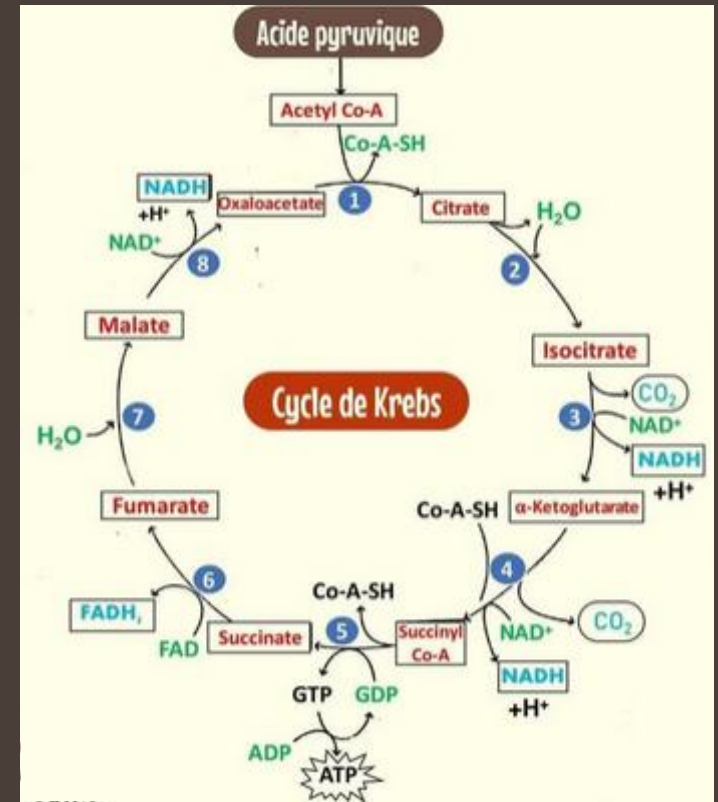
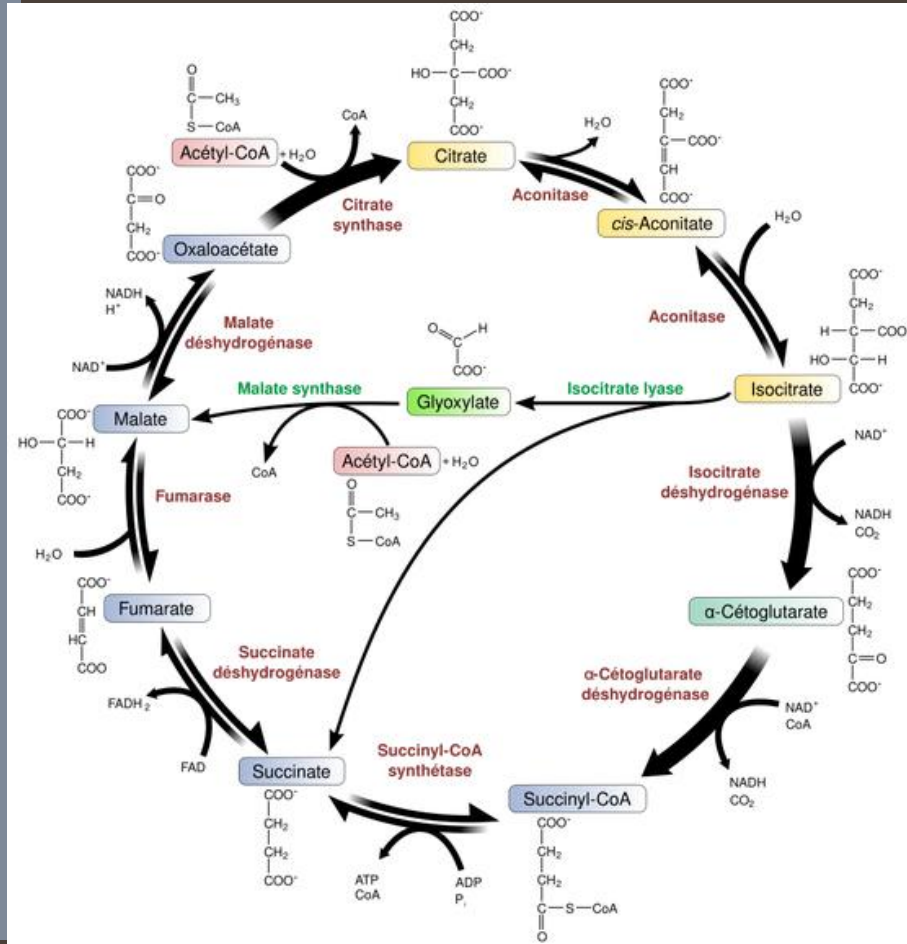
# Cycle de Krebs

## 3) Régénération de l'oxaloacétate

Le succinyl-CoA (4C) est converti en succinate, 1GTP est formé, le groupe CoA sort du cycle. Le succinate devient le fumarate, 1 FADH<sub>2</sub> est formé. Le fumarate est convertit en malate, et enfin oxaloacétate, 1 NADH est formé.



## Cycle plus détaillé:



## IV. Cycle de Krebs

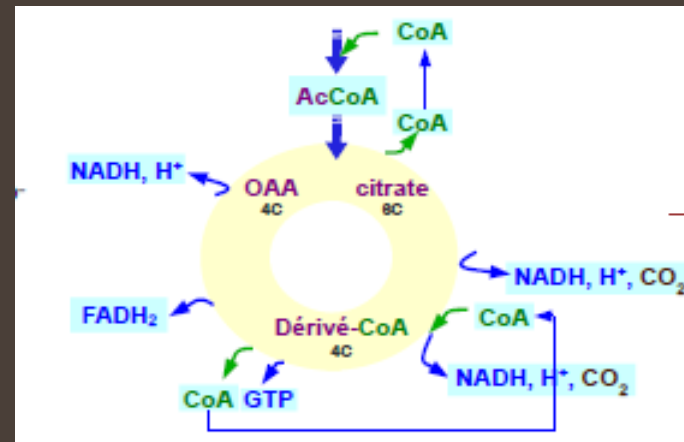
# IV. Cycle de Krebs

Bilan énergétique pour 1 tour de cycle:

Le FADH<sub>2</sub> et le NADH produit vont servir à la chaîne respiratoire pour métaboliser l'oxygène

Produit	Quantité
CO <sub>2</sub>	2
<b>NADH</b>	3
<b>FADH<sub>2</sub></b>	1
GTP/ATP	1

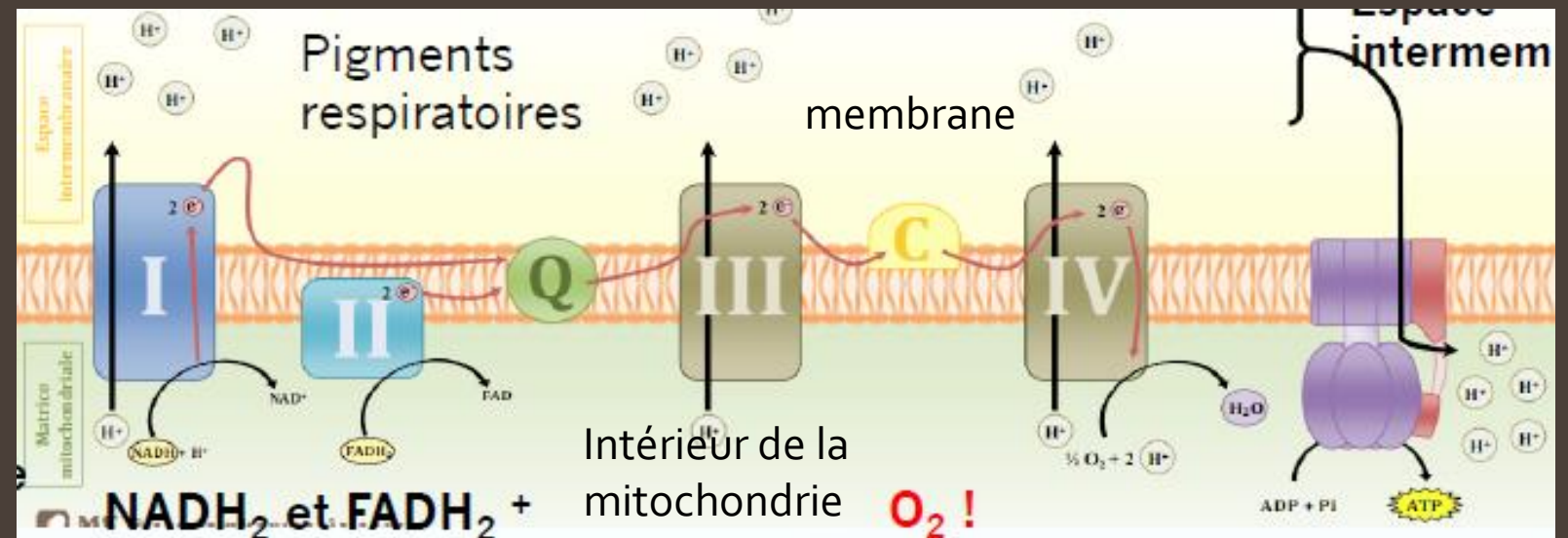
Attention: glucose->2 pyruvates->2 acétyle Coa->2 tours de Krebs possible !



## V. Chaîne respiratoire

- Dans la respiration on expire du CO<sub>2</sub>, qui nous l'avons vu, est produit via le cycle de Krebs. Mais surtout, on absorbe du O<sub>2</sub>. Contrairement au CO<sub>2</sub>, l'O<sub>2</sub> n'intervient pas directement dans le cycle de Krebs, mais joue un rôle essentiel dans la chaîne de transport des électrons, située dans la membrane interne de la mitochondrie.
- C'est dans cette membrane que l'O<sub>2</sub> reçoit les électrons issus des réactions d'oxydation du NADH et FADH<sub>2</sub>, permettant la formation d'H<sub>2</sub>O et la production d'ATP.
- Réaction finale:  $\frac{1}{2} \text{O}_2 + 2\text{e}^- + 2\text{H}^+ \rightarrow \text{H}_2\text{O}$

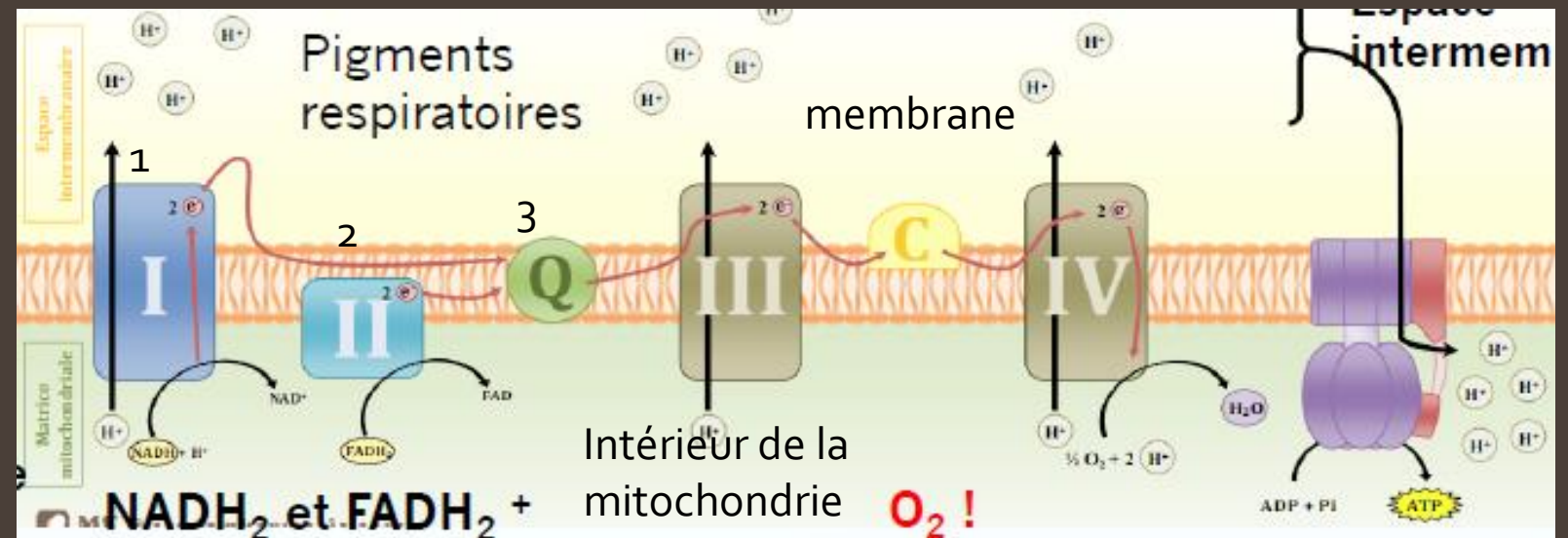
## V. Chaîne respiratoire



- Chaîne de transporteur d'électrons, enchâssée dans la membrane interne de la mitochondrie, On distingue 6 unités protéiques avec l'ATP synthase.

\* $\text{FADH}_2$ : flavine adénine dinucléotide, donne des électrons  
 $\text{NADH}_2$ : nicotinamide adénine dinucléotide, donne des électrons

## V. Chaîne respiratoire

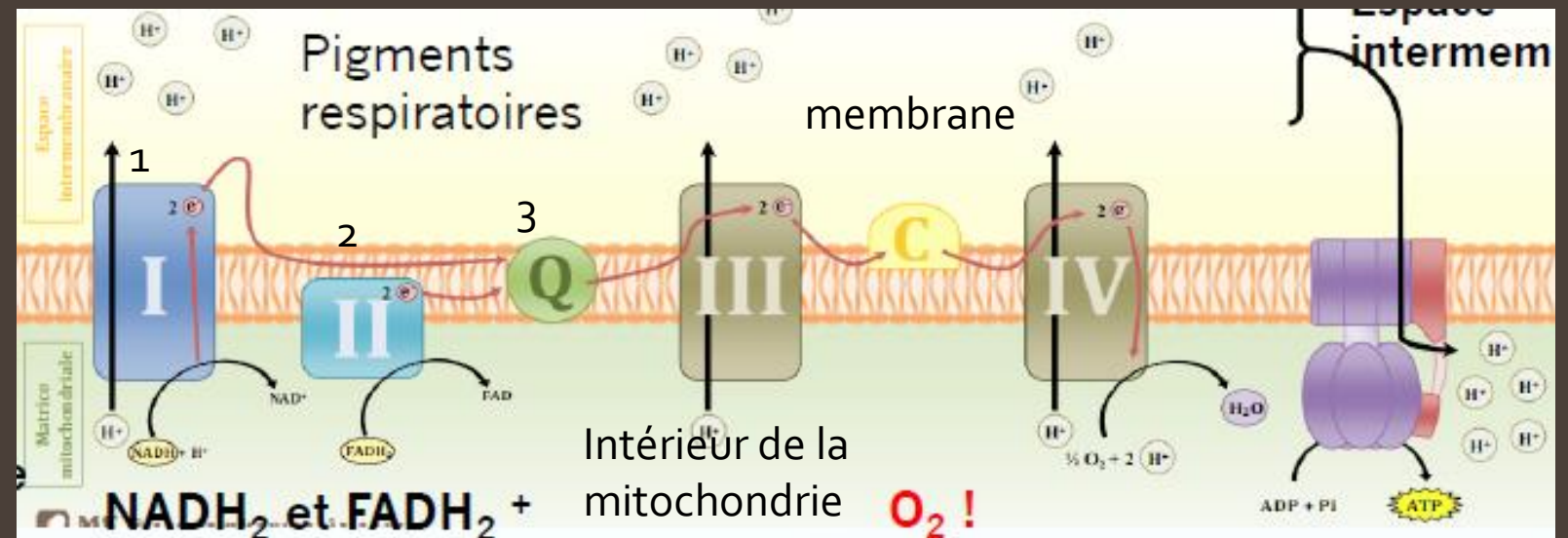


- 1) le complexe protéique I convertit les molécules de  $\text{NADH}$  en  $\text{NAD}^+$ :  
 $\text{NADH}_2 + \text{H}^+ \rightarrow \text{NAD}^+ + 2\text{e}^- + 2\text{H}^+$

Le complexe protéique I récupère les électrons chargé négativement de cette réaction et dans le processus pour s'équilibrer au niveau des charges, fait entrer du  $\text{H}^+$ . Mais comme les électrons vont être transférés, ces protons  $\text{H}^+$  seront par la suite envoyé dans la membrane.

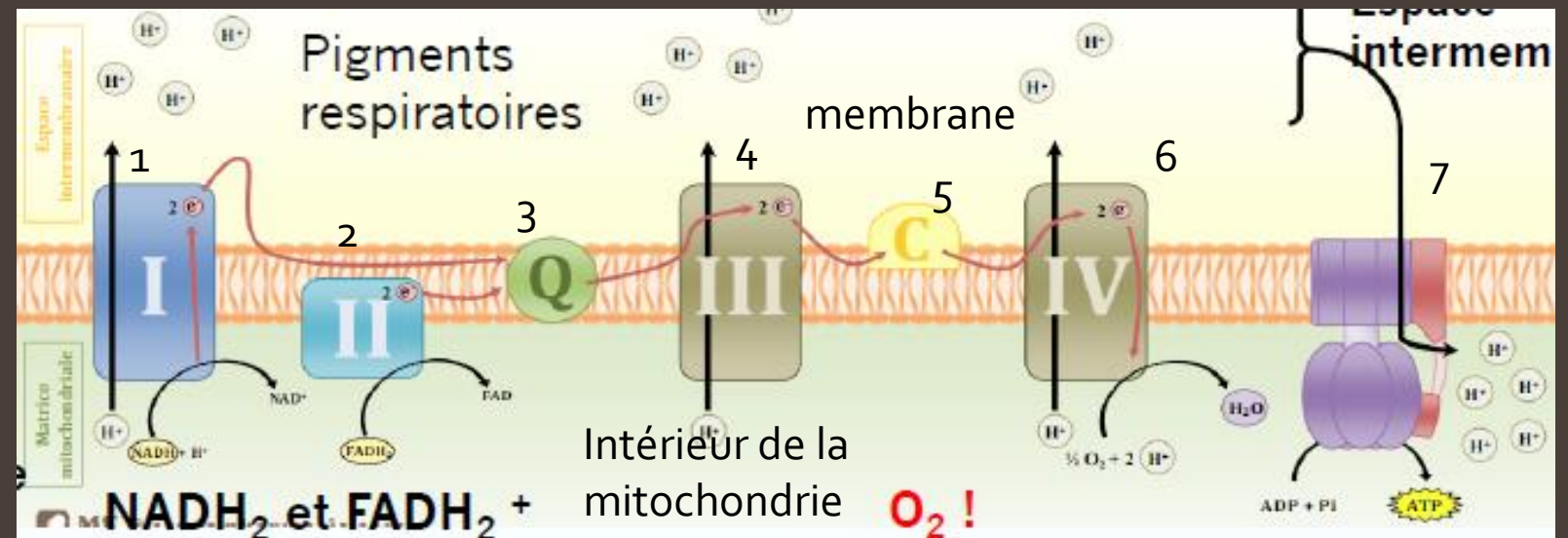
- 3) Les électrons sont envoyer directement au transporteur ubiquinone (Q)

## V. Chaîne respiratoire



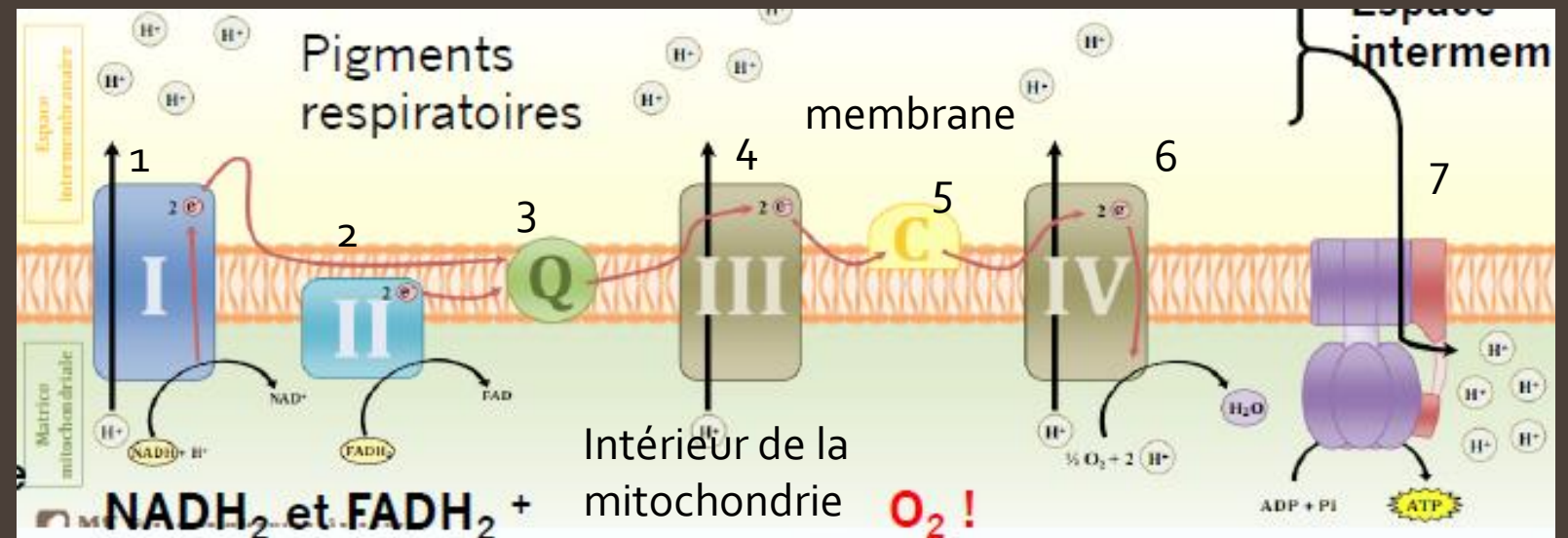
- 2) le complexe protéique II convertit les molécules de FADH<sub>2</sub> en FAD<sup>+</sup> :  $\text{FADH}_2 \rightarrow \text{FAD} + 2\text{e}^- + 2\text{H}^+$
- 3) Les électrons sont envoyés à l'ubiquinone (Q)

## V. Chaîne respiratoire



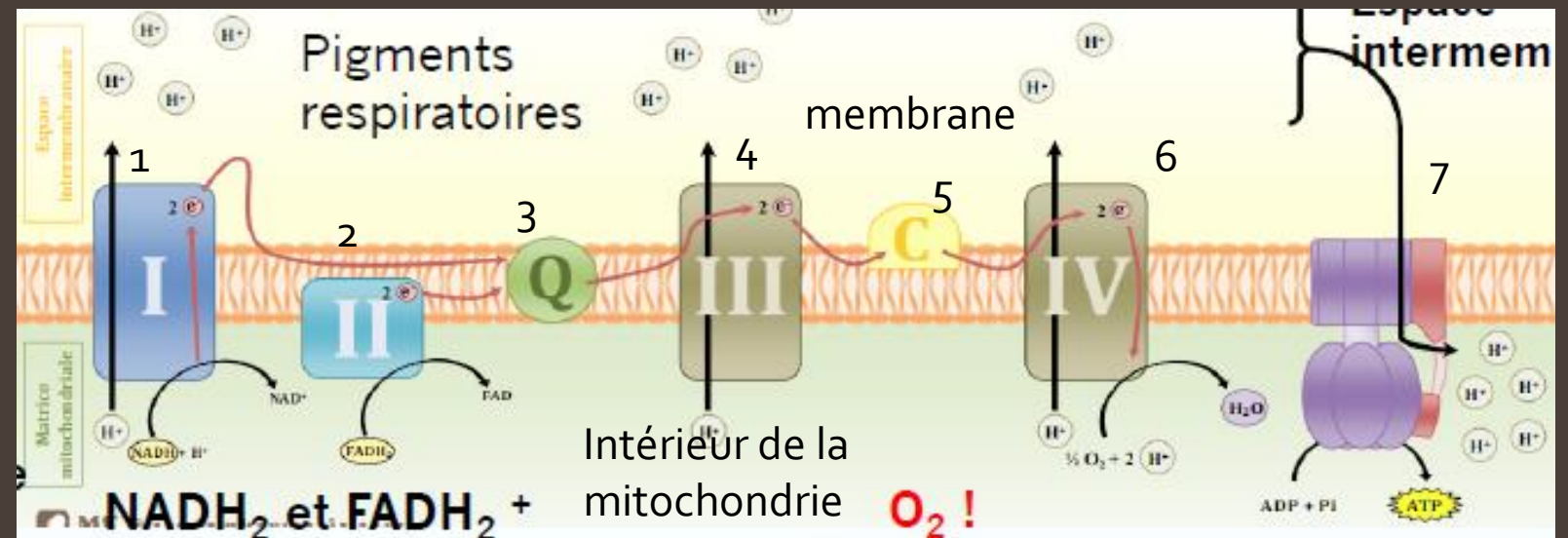
- 4) le complexe protéique III récupère les électrons de Q. Mais, la variation de charge fait une nouvelle fois, entrer du  $\text{H}^+$  dans la membrane.

## V. Chaîne respiratoire



- 5) La protéine C (Cytochrome) récupère les électrons pour les acheminer vers le complexe protéique IV

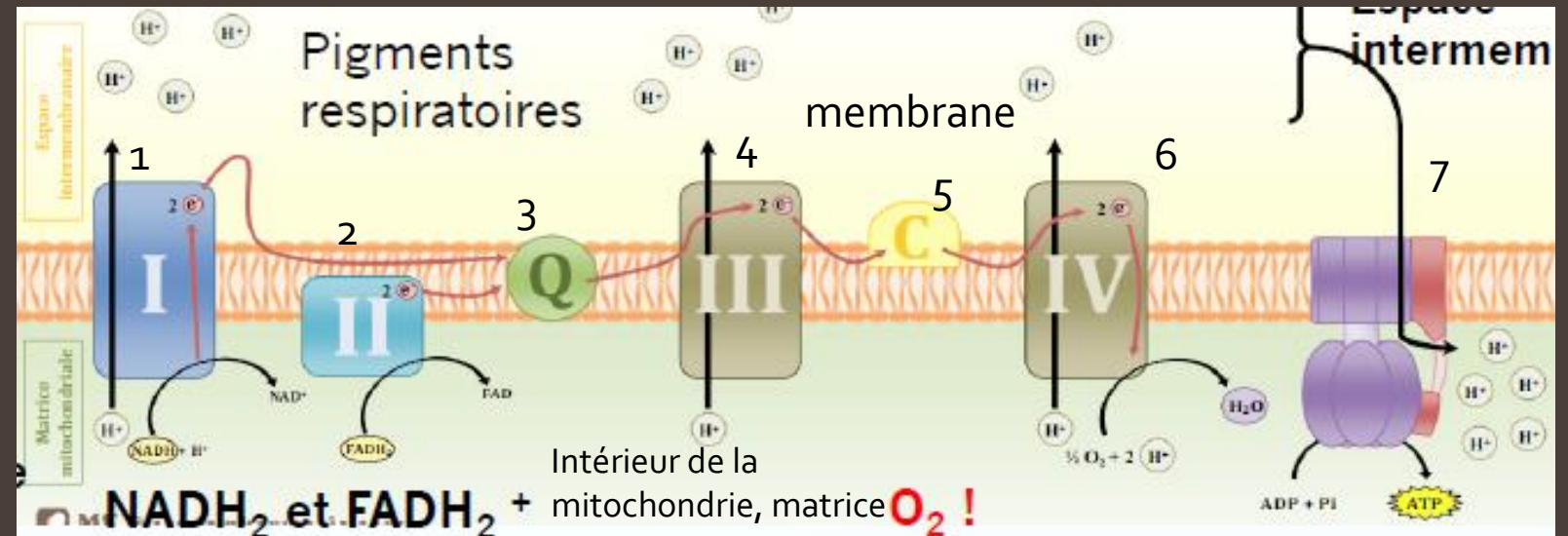
## V. Chaîne respiratoire



- 6) Le complexe protéique IV transfère les électrons issus du NADH et du FADH à l' $\text{O}_2$  dans la mitochondrie et fait encore entrer du  $\text{H}^+$ . Les électrons qui ont été transférés (issus du  $\text{NADH}_2$  et  $\text{FADH}_2$ ) vont servir à convertir le  $\text{O}_2$  en eau.
- $\text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^- \rightarrow 2 \text{H}_2\text{O}$

## V. Chaîne respiratoire

3 entrées intramembranaire de H<sup>+</sup>



- 7) Les complexes protéiques précédents, ont fait rentrer beaucoup de H<sup>+</sup> dans la membrane. Or par principe de diffusion, si on laisse une ouverture, le milieu le plus remplis va se déverser dans l'autre. L'ouverture sera l'ATP synthase, ici encore. En profitant de l'énergie générée par le gradient de H<sup>+</sup>, la mitochondrie va générer de l'ATP, dans la matrice.

## VI. Conclusion

- À partir d'une molécule de glucose, la plante réalise une respiration aérobie qui lui permet de produire environ 30 à 38 molécules d'ATP, selon les conditions cellulaires. Ce processus est très rentable énergétiquement. 2 pyruvates issus du glucose, donnent 2 acétyl CoA, donc **2 tours du cycle de Krebs !**
- $C_6H_{12}O_6 + 6O_2 + 38ADP + 38P_i \rightarrow 6CO_2 + 6H_2O + 38ATP$

	Réaction simplifiée	ATP produit
<b>Glycolyse</b>	Glucose $\rightarrow$ 2 pyruvates + 2 <b>NADH</b>	2 ATP (net)
<b>Oxydation du pyruvate</b>	2 pyruvates $\rightarrow$ 2 acétyl-CoA + 2 <b>NADH</b> + 2 $CO_2$	0 ATP
<b>Cycle de Krebs</b>	2 acétyl-CoA $\rightarrow$ 4 $CO_2$ + 6 <b>NADH</b> + 2 $FADH_2$ + 2 ATP	2 ATP
<b>Chaîne respiratoire</b>	10 $NADH$ + 2 $FADH_2$ + 6 $O_2$ $\rightarrow$ 6 $H_2O$ + ATP	~32-38 ATP

\* $NADH_2$  et  $FADH_2$  donne  $2e^-$  chacun. Or, nous avons 10  $NADH_2$  produit et 2  $FADH_2$ , soit 24 électrons à transporter en 1 cycle (20+4). 1  $O_2$  consomme 4 électrons, donc il faut 6  $O_2$  (24/4) dans la chaîne respiratoire.

## VI. Conclusion

- À partir d'une molécule de glucose, la plante réalise une respiration aérobie qui lui permet de produire environ 30 à 38 molécules d'ATP, selon les conditions cellulaires. Ce processus est très rentable énergétiquement.
- $C_6H_{12}O_6 + 6O_2 + 38ADP + 38P_i \rightarrow 6CO_2 + 6H_2O + 38ATP$

	Réaction simplifiée	ATP produit
<b>Glycolyse</b>	Glucose $\rightarrow$ 2 pyruvates + 2 <b>NADH</b>	2 ATP (net)
<b>Oxydation du pyruvate</b>	2 pyruvates $\rightarrow$ 2 acétyl-CoA + 2 <b>NADH</b> + 2 $CO_2$	0 ATP
<b>Cycle de Krebs</b>	2 acétyl-CoA $\rightarrow$ 4 $CO_2$ + 6 <b>NADH</b> + 2 $FADH_2$ + 2 ATP	2 ATP
<b>Chaîne respiratoire</b>	10 <b>NADH</b> + 2 $FADH_2$ + 6 $O_2$ $\rightarrow$ 6 $H_2O$ + ATP	~32-38 ATP

\*NADH<sub>2</sub> vaut 2,5 ATP environs et FADH<sub>2</sub> en vaut 1,5. Or, nous avons 10 NADPH<sub>2</sub> produit et 2 FADH<sub>2</sub>, soit 28 ATP possiblement produit(25+3). En amont le cycle de Krebs a fournit 2ATP et pareil pour la glycolyse. Soit 32 (28+4) ATP attendu.

- À partir des schémas qui ont été démarrés lors des cours précédents, faite un poster global et précis de l'ensemble des éléments vus dans ce cours.

## VII. Exercice de conclusion

