

Chapitre 3:

Conversion de l'énergie lumineuse en énergie chimique et synthèse de la matière organique

INTRODUCTION:

Les plantes chlorophylliennes se caractérisent par la capacité de synthétiser les substances organiques à partir de substances minérales (eau, sels minéraux et CO₂) en utilisant l'énergie lumineuse. C'est la photosynthèse, phénomène, qui nécessite la présence de la chlorophylle (pigments vert).

- Quels sont les pigments constituant la chlorophylle ?
- Quels est le rôle et les caractéristiques de ces pigments ?
- Où sont localisés ces pigments dans la cellule végétale ?
- Comment les végétaux chlorophylliens utilisent-ils l'énergie lumineuse pour produire la matière organique ?

I – Les pigments chlorophylliens et leur localisation dans la cellule:

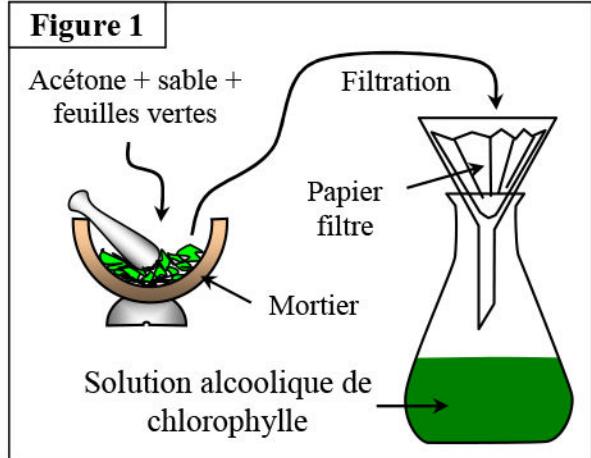
① Extraction et séparation des pigments chlorophylliens:

a) Manipulations : (Voir le document 1)

Document 1: Extraction et séparation des pigments chlorophylliens:

★ Extraction des pigments chlorophylliens des feuilles d'une plante chlorophyllienne (Figure 1):

- On découpe en morceaux quelques feuilles bien vertes, puis on broie ces morceaux dans un mortier avec un peu de sable afin d'écraser les cellules.
- On ajoute peu à peu 10ml d'alcool 90° et on continue à broyer pour solubiliser les pigments.
- On filtre le contenu du mortier sur un papier filtre : la solution obtenue est la chlorophylle brute.

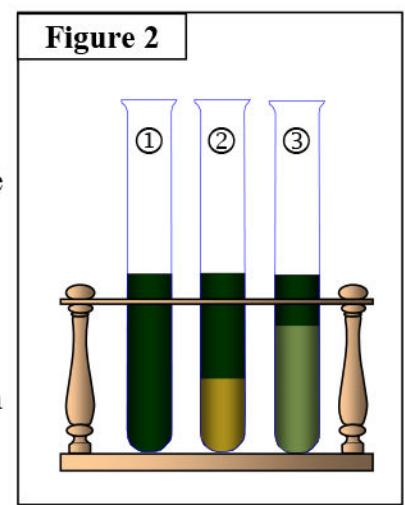


★ Séparation des pigments chlorophylliens par la technique de solubilité différentielle (Figure 2):

On peut séparer les constituants solubles d'un mélange par solubilité différentielle :

On ajoute au mélange des solutions non miscibles entre elles. Chaque substance dissoute sera, alors, entraînée avec la solution où sa solubilité est élevée:

- On verse 5 cm³ de la solution de chlorophylle brute dans un tube à essai (Tube ①).
- On ajoute 5 cm³ d'éther de pétrole puis des gouttes d'eau, et on laisse reposer. On obtient un mélange composé d'un pigment vert et un pigment jaune (tube ②).
- On conserve seulement le pigment vert auquel on ajoute le méthanol (Tube ③).



Document 1: (Suite):

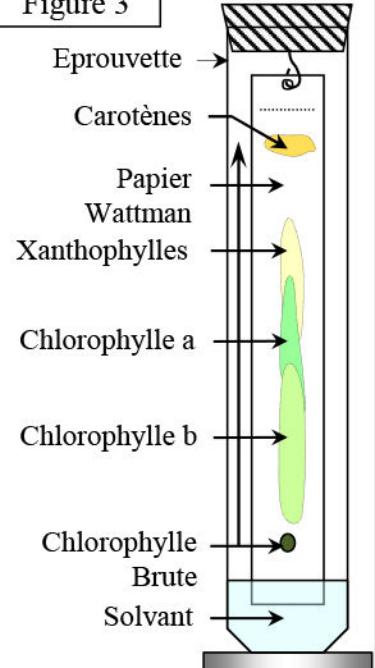
★ Séparation des pigments chlorophylliens par la technique de chromatographie (Figure 3):

Un solvant (alcool, acétone, benzène...) peut progresser par infiltration capillaire à travers différents milieux (papier filtre, papier Wattman...) tout en entraînant des substances qui y sont solubles.

- On dépose, sur une bande de papier Wattman à environ 2 cm du bas, une goutte de la solution de chlorophylle brute.
- On suspend la bande du papier Wattman dans une éprouvette graduée contenant 5 ml de solvant organique (Ether de pétrole (85%) + acétone (10%) + benzène (5%).
- On ferme l'éprouvette en évitant que la bande du papier Wattman touche les parois de l'éprouvette.
- On place l'éprouvette à l'obscurité pendant une demi-heure.

Réalisez les manipulations décrites dans ce document. Identifiez les différents pigments chlorophylliens et déduisez leurs caractéristiques.

Figure 3



b) Analyse et interprétation des résultats:

Une feuille verte broyée dans un solvant organique comme l'alcool ou l'acétone permet d'extraire la chlorophylle brute.

Il est possible de séparer les différents pigments de la chlorophylle brute par plusieurs techniques. La méthode simple, essentiellement qualitative, peut être réalisée par une chromatographie sur papier.

La chlorophylle brute est un mélange de quatre pigments : la chlorophylle a de couleur vert bleutée, la chlorophylle b de couleur vert jaunâtre, les xanthophylles de couleur jaune et le carotène de couleur orange.

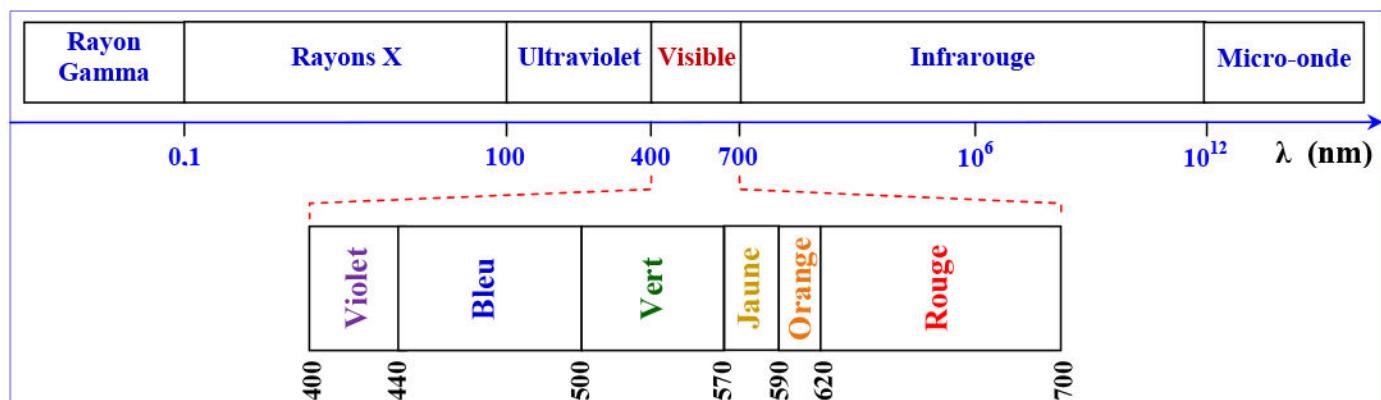
② Propriétés des pigments chlorophylliens:

a) Absorption des radiations lumineuses par la chlorophylle :

1-1 Spectre d'absorption de la chlorophylle : (Voir le document 2)

Document 2: Spectre d'absorption de la chlorophylle:

★ La lumière blanche est un faisceau d'ondes électromagnétiques qui diffèrent par leurs longueur d'onde. En envoyant un rayon de lumière blanche sur la surface d'un prisme, il se décompose donnant un spectre visuel, ensemble d'ondes lumineuses visibles par l'œil humain (Figure ci-dessous).

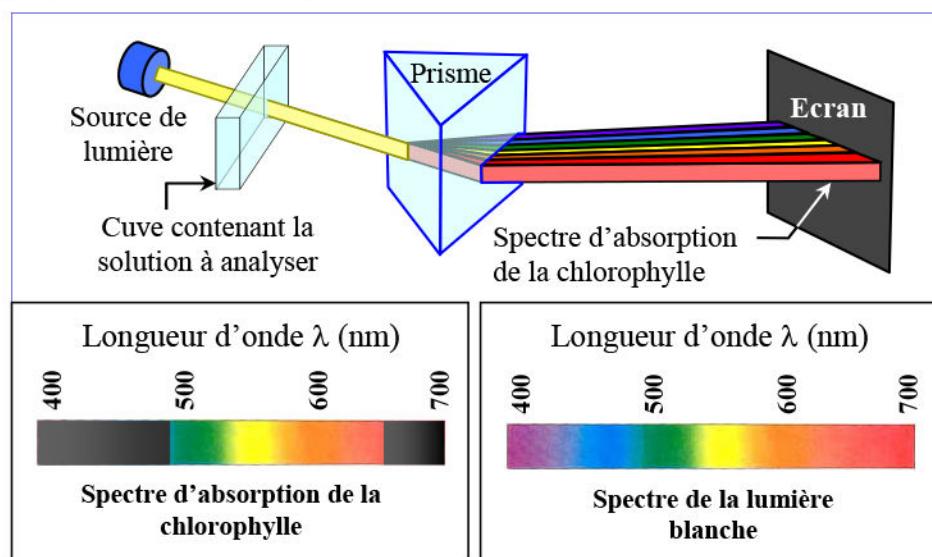


Document 2: (Suite):

★ Pour mettre en évidence les propriétés lumineuses de la chlorophylle brute, on compare le spectre d'absorption de la chlorophylle brute avec le spectre de la lumière blanche.

Pour cela on interpose sur le trajet d'un faisceau de lumière blanche une cuve transparente contenant une solution alcoolique de chlorophylle brute (Figure ci-contre). Les rayons qui émergent de la cuve sont ensuite dirigés sur un prisme de façon à décomposer la lumière.

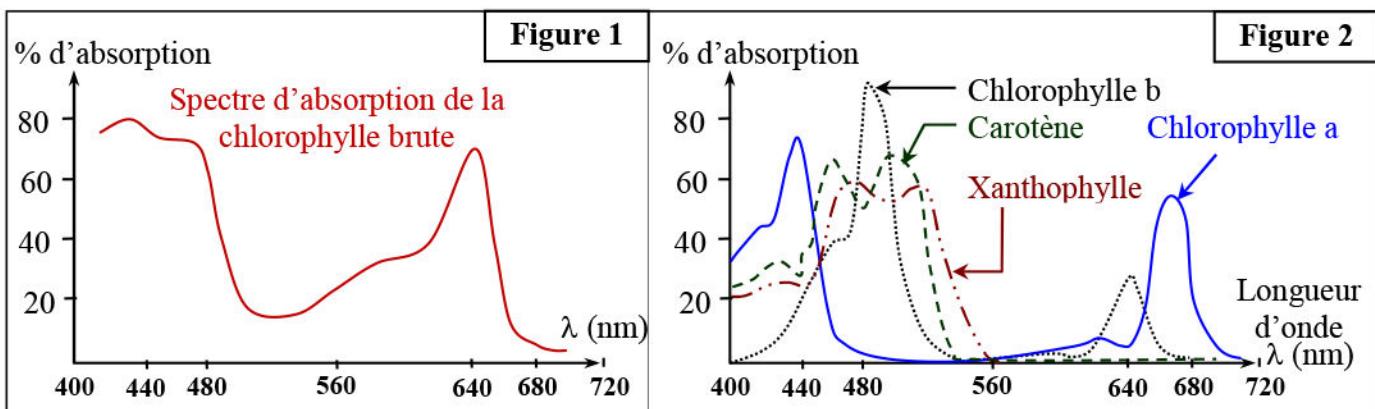
On peut également utiliser un spectroscope à main en plaçant dans le tube une solution de chlorophylle.



★ Des mesures plus précises utilisant des lumières monochromatiques permettent de déterminer pour chaque longueur d'onde, le pourcentage d'énergie lumineuse absorbée.

Les résultats obtenus sont traduits sous forme de courbes constituant les spectres d'absorption :

- ✓ De la chlorophylle brute (La figure 1) ;
- ✓ De chacun des différents pigments chlorophylliens (Figure 2).



- 1) Comparez le spectre d'absorption de la chlorophylle brute au spectre d'émission de la lumière blanche et déduisez quelle sont les radiations absorbées par la chlorophylle brute ?
- 2) Donnez une explication à la couleur verte de la solution de chlorophylle.

- 1) Lorsque la lumière blanche traverse la solution alcoolique de chlorophylle. Puis passe à travers un prisme qui va la décomposer. On observe alors le spectre d'absorption de la chlorophylle. Les raies ou bandes noires observées se trouvent dans les gammes de longueurs d'ondes qui ont été absorbées.

On constate que les couleurs violet, bleu et rouge disparaissent du spectre visuel, elles sont donc absorbées par la chlorophylle brute. Les longueurs d'ondes allant de 500 à 660 nm c'est-à-dire les radiations vertes, ne sont pas absorbées par la chlorophylle brute.

On constate que les pics d'absorption des pigments bruts correspondent aux pics d'absorption de la chlorophylle brute.

On en déduit que les pigments chlorophylliens et principalement la chlorophylle a, absorbent l'énergie de certaines radiations de la lumière visible pour réaliser la photosynthèse.

2) La chlorophylle brute absorbe dans les bandes rouges et bleues et réfléchit la lumière verte. Ce qui explique la couleur verte des feuilles des plantes chlorophylliennes.

1-2 Influence des radiations lumineuses sur l'efficacité de la photosynthèse : (Voir doc 3)

Document 3: Influence des radiations lumineuses sur l'intensité de la photosynthèse:

Afin de montrer l'influence des différentes radiations lumineuses absorbées sur l'intensité de la photosynthèse, on propose données suivantes :

★ Expérience d'Engelmann (1882) :

Engelmann a utilisé une algue filamenteuse, la Spirogyre, pourvue sur toute sa longueur d'un ou plusieurs chloroplastes spiralés. Il la place dans un milieu contenant une suspension de bactéries, le Bacterium thermo doté d'un chimiotactisme positif pour l'oxygène. Il l'éclaire par un spectre de la lumière blanche.

La figure ci-contre présente la répartition des bactéries après quelques minutes.

- 1) Si l'on éclaire la préparation au travers d'un prisme qui décompose la lumière, les bactéries se rassemblent contre l'algue mais essentiellement dans les régions soumises à des radiations bleues ou rouges. On en déduit que ce sont ces radiations qui sont les plus efficaces pour la production d'oxygène donc pour la photosynthèse.
Cette expérience établit donc le spectre d'action de la lumière sur la photosynthèse.
- 2) La quantité de dioxygène rejeté (ou de dioxyde de carbone absorbé) permet de mesurer indirectement l'intensité de la photosynthèse chez une plante chlorophyllienne.
On constate que l'intensité photosynthétique varie selon le type de radiation lumineuse absorbée. L'intensité photosynthétique est maximale dans les radiations rouges et bleues, faible dans le jaune et nulle dans le vert.

Hypothèse : La photosynthèse nécessite l'absorption de certaines longueurs d'ondes grâce aux pigments chlorophylliens.

- 3) L'établissement du spectre d'action, de la photosynthèse correspond à l'efficacité photosynthétique en fonction des longueurs d'ondes.

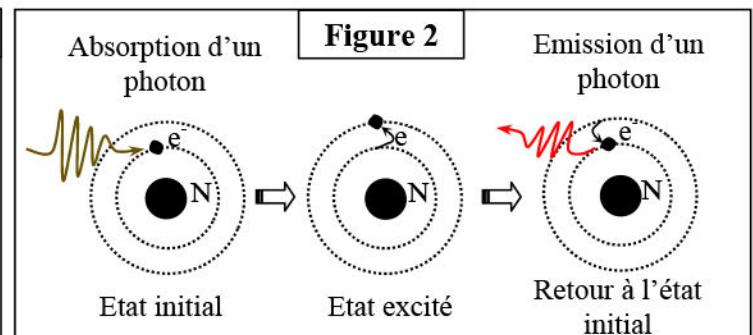
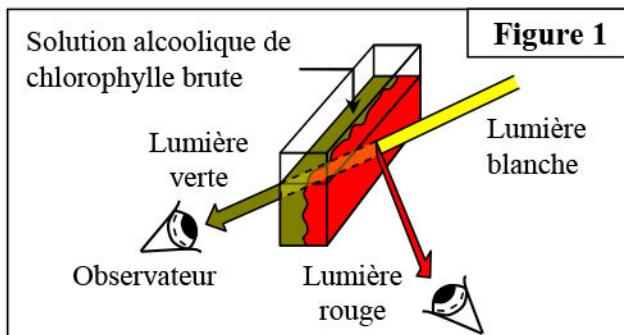
On constate que le spectre d'action de la chlorophylle et son spectre d'action se concordent parfaitement. Cela signifie que les radiations lumineuses les plus absorbées par la chlorophylle sont les radiations les plus efficaces pour la photosynthèse.

b) Rôle des pigments chlorophylliens dans la conversion de l'énergie lumineuse en énergie chimique: (Voir le document 4)

Document 4: Rôle des pigments chlorophylliens dans la conversion de l'énergie lumineuse en énergie chimique:

★ Lorsqu'on projette la lumière blanche sur une solution de chlorophylle brute, elle apparaît rouge du côté de projection de la lumière, et verte du côté opposé au côté de projection de la lumière (Figure 1): la chlorophylle émet des radiations rouges, on parle de fluorescence.

★ La chlorophylle est composée de pigments photosynthétiques qui peuvent être excités par les radiations lumineuses (Figure 2). L'arrivée d'un photon fait passer un électron délocalisé d'un état fondamental (non excité) à un état excité. La chlorophylle, une fois excitée, retourne à son état fondamental, plus stable thermodynamiquement. Ceci peut se faire de plusieurs manières, et en particulier en émettant de la lumière (c'est la fluorescence constatée dans une solution de chlorophylle brute) ou en perdant un électron.



★ Les pigments chlorophylliens s'organisent en groupes appelés photosystèmes qui sont de deux types : PS_I et PS_{II} (Figure 3).

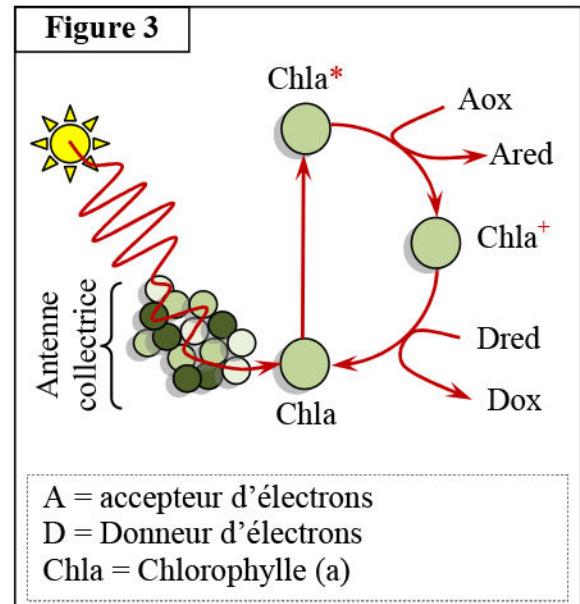
Chaque photosystème est constitué d'un centre réactionnel formé d'un dimère de chlorophylle (a), en plus d'une antenne collectrice formée d'un mélange de pigments chlorophylliens différents. La chlorophylle (a), centre réactionnel, en absorbant l'énergie passe à un état excité puis s'oxyde en cédant des électrons à un accepteur d'électrons.

Document 4: (Suite) :

La chlorophylle (a), oxydée, doit récupérer des électrons pour restaurer son état initial et continuer à fonctionner ; ces électrons lui sont fournis par un donneur d'électrons réduit.

En exploitant les données de ce document :

- 1) Expliquer le phénomène de la fluorescence observé chez la chlorophylle brute éclairée.
- 2) Sachant que la fluorescence disparaîtra si on ajoute un accepteur d'électron à la solution de chlorophylle, expliquez l'absence de la fluorescence lorsque la chlorophylle se trouve dans les conditions naturelles.
- 3) Expliquez le rôle des photosystèmes dans la transformation de l'énergie lumineuse en énergie chimique.



- 1) Lorsqu'un photon est absorbé par la chlorophylle brute, un de ses électrons passe à une orbitale plus élevée. L'électron ne peut pas rester longtemps dans un état excité qui est instable. Il regagne son niveau énergétique inférieur en libérant une énergie sous forme de chaleur et de lumière rouge, c'est la fluorescence.
- 2) In vivo, dans les cellules chlorophylliennes, le phénomène de fluorescence est trop faible pour être décelé. Cela suppose que l'énergie lumineuse captée par les pigments chlorophylliens dans ces conditions, est transmise à d'autres molécules intervenant dans la photosynthèse.
- 3) Dans chaque photosystème, l'énergie lumineuse est collectée par les pigments chlorophylliens situés dans l'antenne collectrice. Cette énergie est transmise au centre réactionnel formé de la chlorophylle (a) qui devient excité et cède un électron à un accepteur d'électrons. La chlorophylle (a) oxydée, est capable d'accepter un électron provenant d'un donneur d'électrons, et récupérer son état initial.

Les réactions d'oxydoréduction sont donc des réactions chimiques qui impliquent des échanges d'électrons et de protons.

③ Les structures cellulaires renfermant la chlorophylle:

- a) Siège de synthèse de la matière organique : (Voir le document 5)

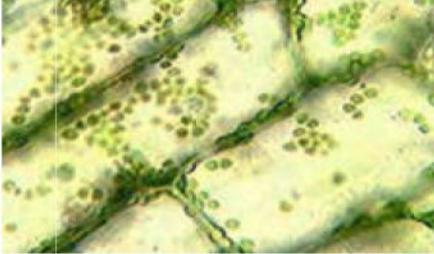
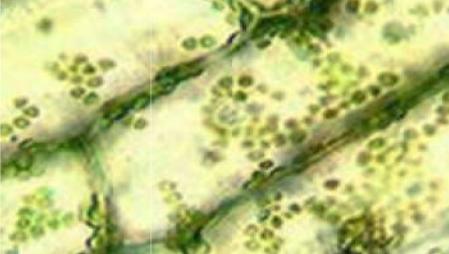
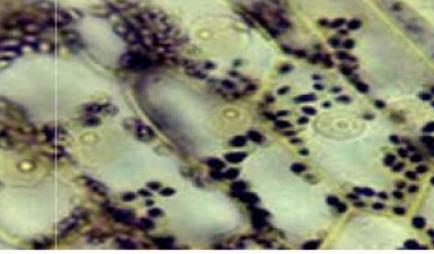
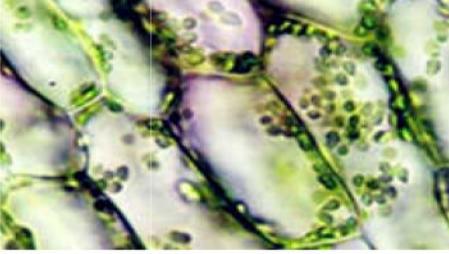
Document 5: Siège de synthèse de la matière organique:

Pour mettre en évidence les structures cellulaires renfermant la chlorophylle, on réalise les expériences décrites dans le tableau ci-dessous.

La recherche de la matière organique produite par l'élodée se fait, par une coloration à l'eau iodée: une coloration noirâtre révèle la présence d'amidon et donc d'une photosynthèse.

Comment expliquer la différence d'aspect des cellules dans les deux expériences ? que déduit-on à propos du lieu de synthèse de l'amidon au niveau de la cellule ?

Document 5: (Suite):

	Elodées placées à la lumière et dans une eau riche en dioxyde de carbone	Elodées placées à la lumière et dans une eau appauvrie en dioxyde de carbone
Observations au microscope des feuilles d'élodée au début de l'expérimentation après coloration à l'eau iodée		
Observations au microscope des feuilles d'élodée à la fin de l'expérimentation après coloration à l'eau iodée		

Les cellules chlorophylliennes sont caractérisées par la présence d'organites spéciaux dits : Chloroplastes.

Les chloroplastes apparaissent, au microscope, sous forme de lentilles dont la taille varie de 4 à 10 μm . Ils nagent autour de la vacuole.

Les chloroplastes apparaissent colorés en noir dans un milieu présentant les conditions favorable à la photosynthèse.

On en déduit que le chloroplaste est l'organite de la cellule végétale où se réalise la synthèse d'amidon. Donc le chloroplaste siège de la photosynthèse, renferme les pigments chlorophylliens.

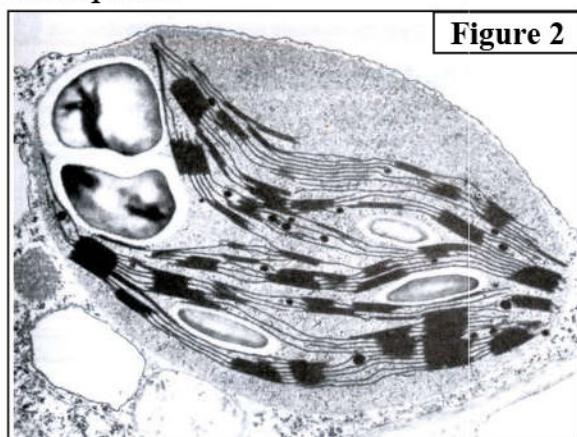
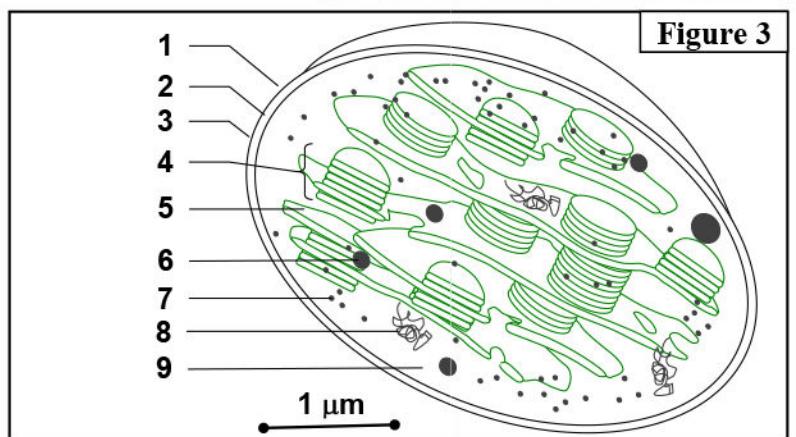
b) Structure et ultrastructure du chloroplaste : (Voir le document 6)**Document 6: Structure et ultrastructure du chloroplaste:**

★ La figure 1 : C'est une observation au microscope optique d'une cellule de la feuille d'élodée présentant des chloroplastes.



★ La figure 2 est une photographie au microscope électronique d'un chloroplaste le soir, on y voit beaucoup d'amidon sous formes de grains d'amidon.

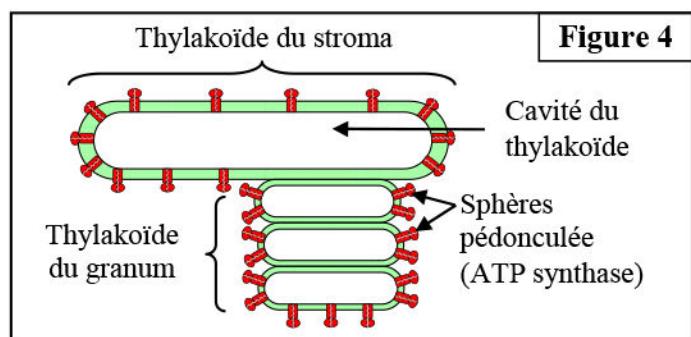
★ La figure 3 : Schéma d'interprétation de la structure du chloroplaste.

**Figure 2****Figure 3**

Document 6: (Suite):

★ La figure 4 : Schéma d'interprétation de l'ultrastructure des thylakoïde.

- 1) Annoter la figure 3 schématisant les différentes structures du chloroplaste.
- 2) En se basant sur les données de ce document, décrire la structure et l'ultrastructure du chloroplaste.



- 1) Légende de la figure 3 : 1 = membrane externe ; 2 = membrane interne ; 3 = espace intermembranaire; 4 = granum ; 5 = thylakoïde ; 6 = plastoglobule ; 7 = plastoribosome ; 8 = ADN chloroplastique ; 9 = stroma.
- 2) Les chloroplastes sont des organites présents dans le cytoplasme des cellules végétales eucaryotes. Ils sont caractérisés par leurs pigments chlorophylliens qui assurent l'absorption de l'énergie lumineuse qu'ils transforment en énergie chimique au cours de la photosynthèse.

L'observation microscopique montre que le chloroplaste contient une substance non structurée appelée stroma, délimité par une double membrane, et des sacs aplatis appelés thylakoïdes. Les thylakoïdes s'empilent formant des structures appelées grana (grana au singulier).

Le chloroplaste est donc constitué de deux compartiments séparés par la membrane des thylakoïdes: l'espace interne (ou lumen) et le stroma.

Les membranes des thylakoïdes contiennent les éléments nécessaires à la capture de l'énergie lumineuse : les photosystèmes PSI et PSII, des enzymes comme l'ATPSynthase (Sphères pédonculées), des protéines transporteurs de protons et d'électrons.

II – Les principales réactions de la photosynthèse:

① Mise en évidence des phases de la photosynthèse:

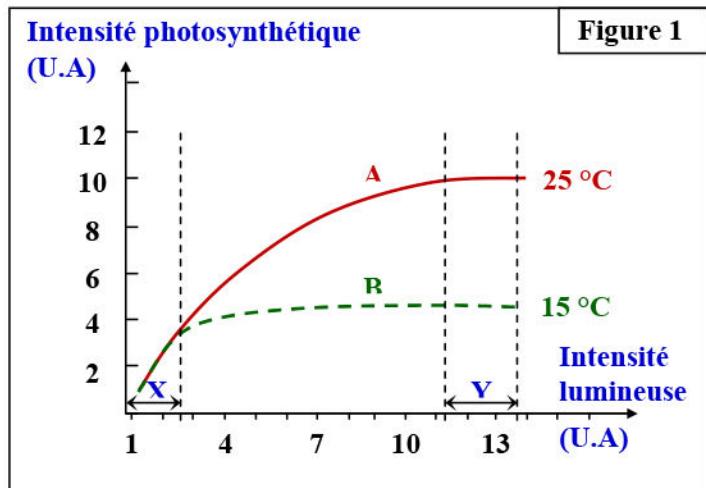
a) Expérience d'Emerson et Arnold (1932): (Voir le document 7)

Document 7: Expérience d'Emerson et Arnold:

★ Dès 1905, Blackmann avait remarqué que la photosynthèse dépend à la fois de la lumière et de la température alors que les réactions chimiques dépendent de l'une ou de l'autre selon leur nature (photochimique ou thermochimique). Cette observation le conduit à l'hypothèse que la photosynthèse devait résulter de 2 types de réactions chimiques différentes, photochimiques et thermochimiques.

Pour mettre en évidence les deux phases, Blackmann cultiva des plantes en faisant varier l'intensité lumineuse et la température et enregistra l'impact de ces paramètres sur l'activité photosynthétique. La figure 1 représente les résultats de cette expérience.

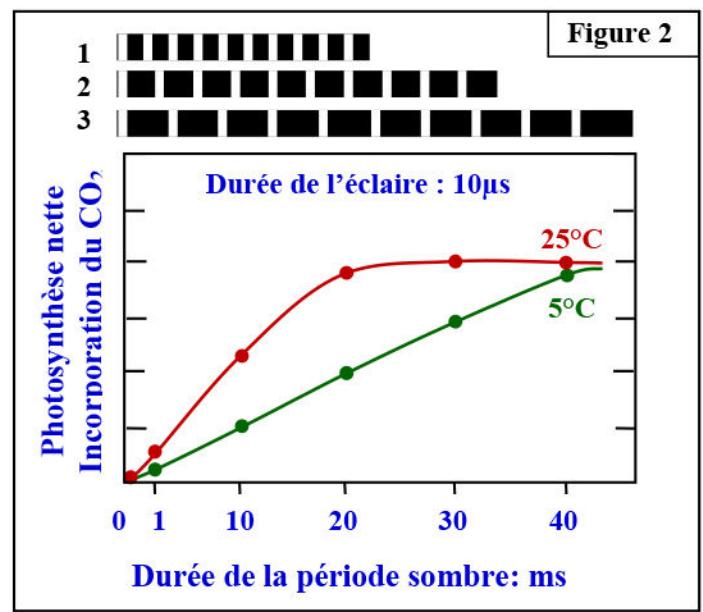
- 1) A partir de l'analyse de ces résultats, mettez en évidence l'hypothèse de Blackmann.



Document 7 : (Suite):

★ La confirmation expérimentale en fut apportée en 1932 par R. Emerson et W. Arnold. Éclairant une suspension de Chlorelles (algues vertes) avec des éclairs très brefs ($10\mu\text{s}$), séparés par des intervalles d'obscurité de durées croissantes (entre 1 et 40 ms), il mesura leur activité photosynthétique en déterminant l'intensité d'incorporation du CO_2 . Les résultats sont retranscrits sous forme de graphiques (Figure 2).

- 2) Expliquez en quoi les résultats de cette expérience prouvent l'existence de deux phases dans les réactions de la photosynthèse.



b) Analyse et interprétation des résultats:

- 1) A partir des données de la figure 1, on constate que:

L'activité photosynthétique augmente proportionnellement à l'éclairement pour les intensités lumineuses faibles et moyennes. Mais qu'elle n'augmente plus au-delà d'une certaine intensité lumineuse. Ce seuil correspond à une activité photosynthétique maximale qui varie avec la température. Il est plus élevé aux hautes températures.

Pendant la période X, l'intensité photosynthétique est indépendante de la température mais dépend de l'intensité lumineuse.

Pendant la période Y, l'intensité photosynthétique est indépendante de l'intensité lumineuse, mais dépend de la température.

La photosynthèse se déroule en deux phases:

- ✓ Une phase dépendante de la lumière, appelée phase claire ou photochimique.
- ✓ Une phase dépendante de la température, appelée phase sombre ou thermochimique.

- 2) A partir des données de la figure 1, on constate que:

- A 25°C : une période sombre totale d'environ 20 ms (2000 fois plus importante) pour obtenir une photosynthèse nette maximum.
- A 5°C , la durée de la période sombre augmente, mais la photosynthèse nette maximale est la même.

Conclusion:

Dans les conditions de cette expérience (éclairement total bref et saturant), il faut une période sombre importante pour obtenir une photosynthèse maximale.

Ceci suggère que des intermédiaires sont formés à la lumière rapidement (de manière quasi insensible à la température) = réactions photochimiques, et qu'ils sont utilisés beaucoup plus lentement par des réactions chimiques (sensibles à la température) = réactions biochimiques d'assimilation du CO_2 .

Remarque :

On parle de façon abusive de réactions dites "claires" et "sombres, mais, dans les conditions normales (lumière continue), ces deux groupes de se déroulent conjointement à la lumière. Donc, il faut préférer les termes de "réactions photochimiques" et de "réactions biochimiques d'assimilation du CO₂" respectivement.

② Les principales réactions de la photosynthèse:

a) Les réactions de la phase photochimique « claire »:

⇒ La photolyse de l'eau :

Grâce à l'énergie lumineuse, les cellules chlorophylliennes produisent de l'O₂ et des molécules organiques à partir de l'eau et du CO₂. L'équation globale de la photosynthèse s'écrit donc : 6 CO₂ + 6 H₂O -----> C₆H₁₂O₆ + 6 O₂

Comme hypothèse on peut dire que le dioxygène dégagé par la plante peut provenir soit du CO₂, ou de H₂O. (Voir le document 8)

Document 8: Mise évidence de la photolyse de l'eau:

Expérience de Ruben et Kamen : Pour déterminer l'origine du dioxygène (O₂) rejeté au cours de la photosynthèse, Ruben et Kamen ont mis en culture des chlorelles dans deux milieux différents:

- ✓ Milieu 1 : approvisionné en eau contenant l'oxygène normal H₂O¹⁶ et du dioxyde de carbone marqué par l'oxygène radioactif CO₂¹⁸.
- ✓ Milieu 2 : approvisionné en eau marqué par l'oxygène radioactif H₂O¹⁸ et du dioxyde de carbone contenant l'oxygène normal CO₂¹⁶.

Dans chaque milieu, les deux chercheurs ont analysé le dioxygène (O₂) rejeté. Les résultats figurent sur le tableau suivant:

Milieu	Contenu du milieu	La nature du dioxygène (O ₂) rejeté
1	CO ₂ ¹⁸ + H ₂ O ¹⁶	O ₂ ¹⁶
2	CO ₂ ¹⁶ + H ₂ O ¹⁸	O ₂ ¹⁸

A partir de l'analyse de ces résultats, déterminez l'origine du dioxygène dégagé au cours de la photosynthèse. Ecrivez la réaction responsable, sachant que l'émission d'une molécule d'O₂ demande l'oxydation de deux molécules de H₂O.

Si l'on fournit à la plante du CO₂ dont l'oxygène est de l'oxygène lourd O¹⁸, l'oxygène dégagé au cours de la photosynthèse est de l'oxygène léger O¹⁶.

Si l'on fournit à la plante de l'eau dont l'oxygène est de l'oxygène lourd O¹⁸, l'oxygène dégagé au cours de la photosynthèse est de l'oxygène lourd O¹⁸.

Cette expérience montre que le dioxygène rejeté au cours de la photosynthèse est issu de l'eau et non du dioxyde de carbone.

En présence de la lumière, la molécule d'eau se dissocie et libère le dioxygène (O₂), selon la réaction suivante: 2H₂O₂ -----> 4H⁺ + 4e⁻ + O₂

Cette réaction, est une oxydation de l'eau, appelée photolyse de l'eau.

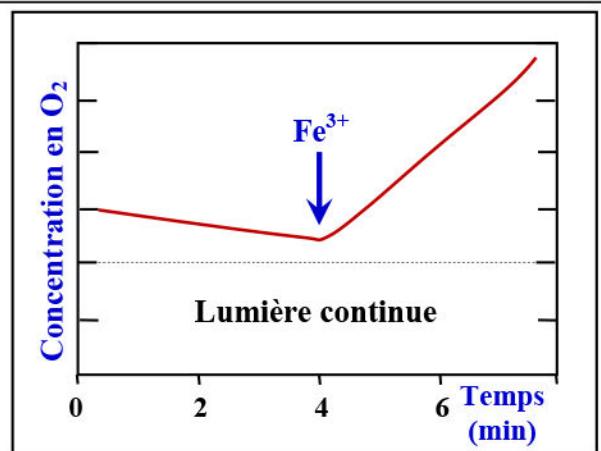
⇒ La photolyse de l'eau nécessite un accepteur d'électrons :

Sachant que l'oxydation correspond à une perte d'électrons, la production d' O_2 au cours de la photosynthèse nécessite un accepteur d'électrons (Voir document 9).

Document 9: Expérience de Hill:

Hill utilise une suspension de chloroplastes isolés dans un tampon sans CO_2 . Il mesure les variations de dioxygène à l'aide d'une électrode à oxygène. Il ajoute à la préparation un accepteur artificiel d'électrons, le ferricyanure de potassium, $K_3Fe^{3+}(CN)_6$ (réactif de Hill) et travaille en lumière continue. Le réactif de Hill se comporte comme un accepteur d'électron : Fe^{3+} (ferricyanure) + $e^- \rightarrow Fe^{2+}$ (ferrocyanure).

Les résultats de cette expérience figurent sur le graphe ci-contre.



Analysez ces résultats et précisez les conditions nécessaires au dégagement d'oxygène.

- En lumière continue, les chloroplastes isolés en suspension dans un tampon produisent du dioxygène, à condition que le milieu contienne une substance chimique capable de fixer des électrons (Fe^{3+}).



- La réaction de Hill montre que la production de dioxygène et donc la photosynthèse ne se fait qu'en présence de lumière et d'un accepteur d'électrons et de protons.
- Dans les conditions naturelles de la photosynthèse, ce rôle d'accepteur d'électron est rempli par une molécule appelée nicotinamide adénine dinucléotide ($NADP^+$) présente dans le stroma des chloroplastes et qui peut accepter des électrons et des protons (H^+) suivant la réaction:



⇒ Destiné des électrons perdus par la chlorophylle (a) : (Voir document 10).

Document 10: Destiné des électrons perdus par la chlorophylle (a):

Une réaction d'oxydoréduction (réaction redox) est une réaction chimique au cours de laquelle se produit un échange d'électrons. L'espèce chimique qui capte les électrons est appelée « oxydant »; celle qui les cède, « réducteur ».

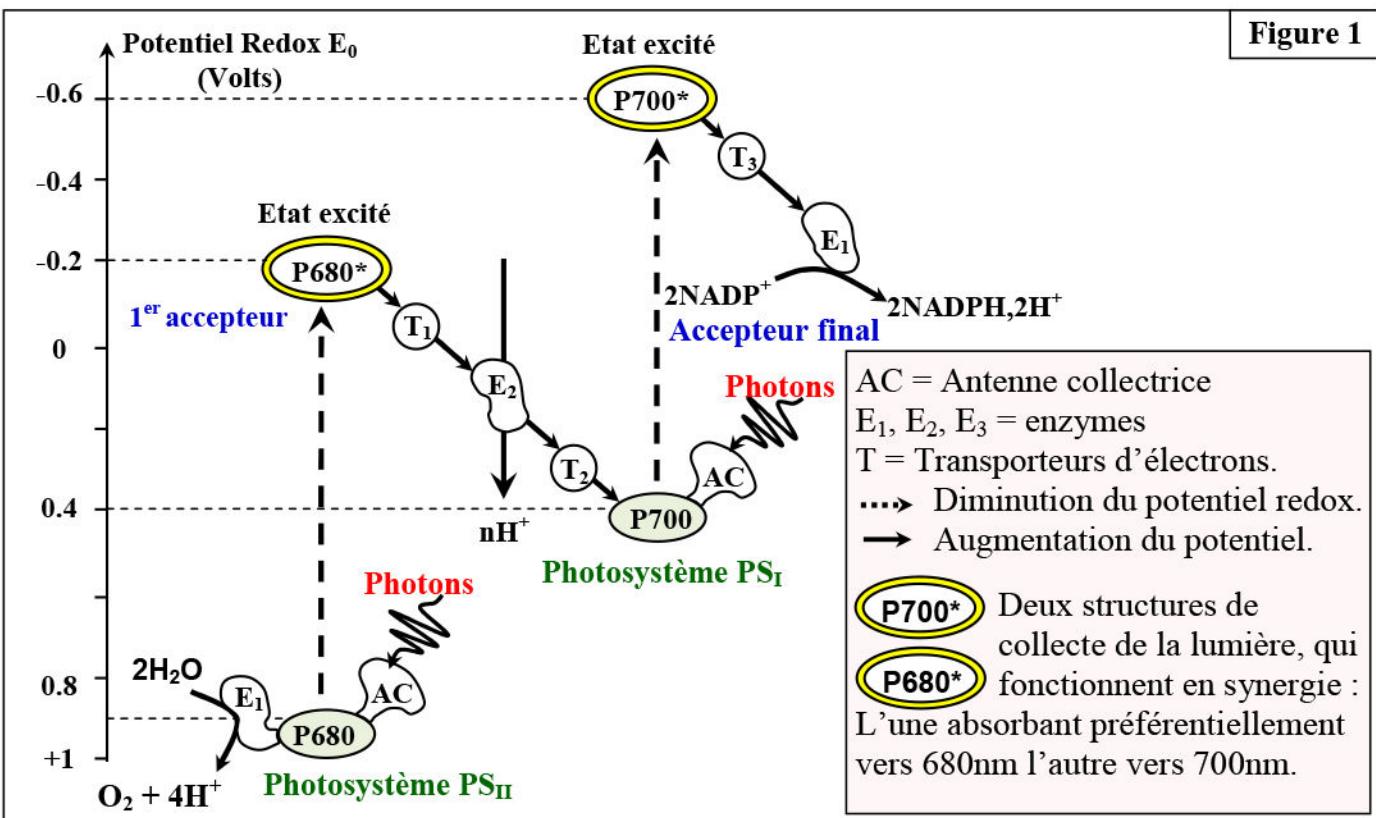
Chaque couple «redox» se caractérise par son potentiel d'oxydoréduction (E_0) qui exprime sa capacité de réduction. Les électrons se déplacent spontanément du couple «redox» qui a le potentiel d'oxydoréduction faible vers celui qui a le potentiel d'oxydoréduction plus élevé.

Les deux types de photosystèmes qui existent dans la membrane des thylakoïdes sont reliés par un complexe de transporteurs d'électrons. L'ensemble constitue une chaîne photosynthétique.

★ Le schéma de la figure 1, montre comment les électrons sont transférés depuis la molécule d'eau jusqu'au $NADP^+$, à travers PSII, PSI, les enzymes et les transporteurs d'électrons. Ce schéma, dit schéma en Z, représente chaque élément selon son potentiel redox (exprimé en mV).

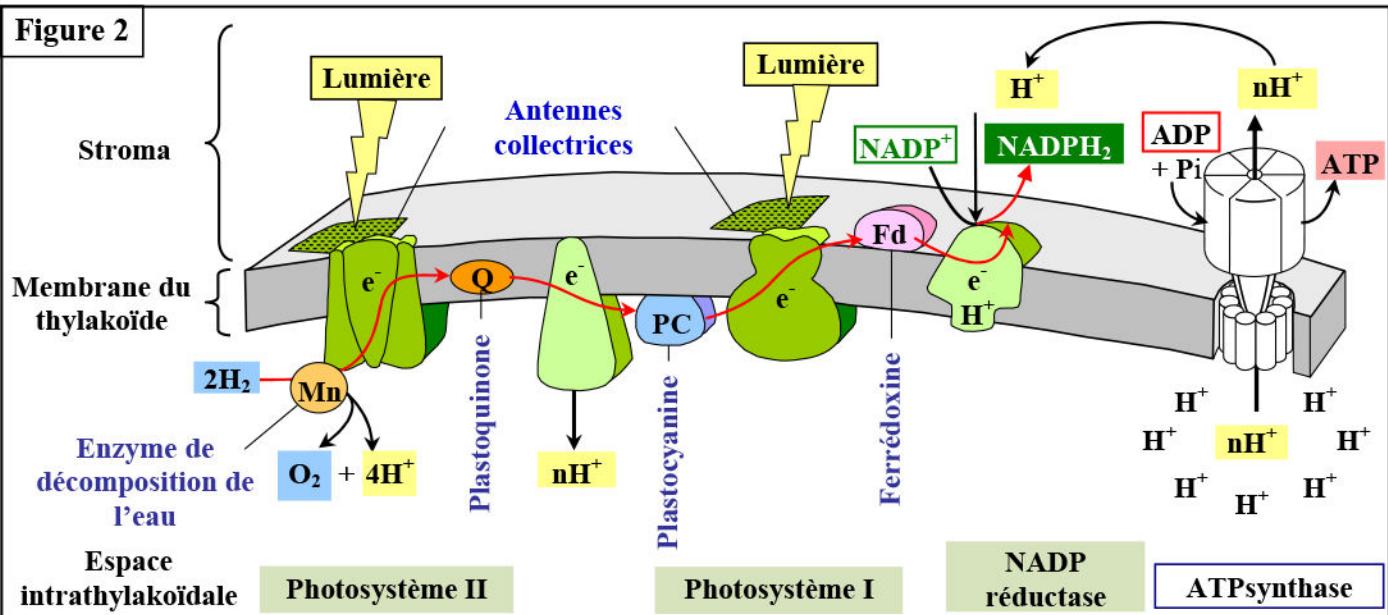
Document 10: (Suite):

Figure 1



★ Les transporteurs d'électrons de la membrane des thylakoïdes s'organisent en deux chaînes, chacune débute par un photosystème PSII et PSI, l'ensemble forme une chaîne photosynthétique (Figure 2).

Figure 2



- 1) A partir des données de la figure 1, déterminez comment les électrons libérés par la chlorophylle (a) sont transférés du photosystème PSII jusqu'à l'accepteur final NADP⁺, sachant que le transfert d'électrons ne s'effectue spontanément que dans le sens des potentiels redox croissant.

★ Relation entre la synthèse d'ATP et l'activité photosynthétique:

Pour déterminer la relation entre la synthèse d'ATP et l'activité photosynthétique, le chercheur ARNON et ses collaborateurs ont réalisés une expérience qui consiste à compter le nombre de moles d'ATP synthétisées en fonction de la quantité de dioxygène rejeté.

Document 10: (Suite):

Les résultats sont représentés par le graphe de la figure 3:

- 2) Que peut-on conclure de l'analyse de ces résultats ?

L'ATP (L'adénosine triphosphate) est un ribonucléotide formé de l'adénosine (ribose + d'adénine) et de trois groupements phosphate. Sachant que:

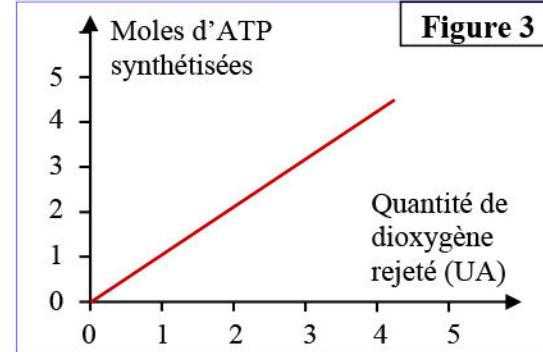


Figure 3

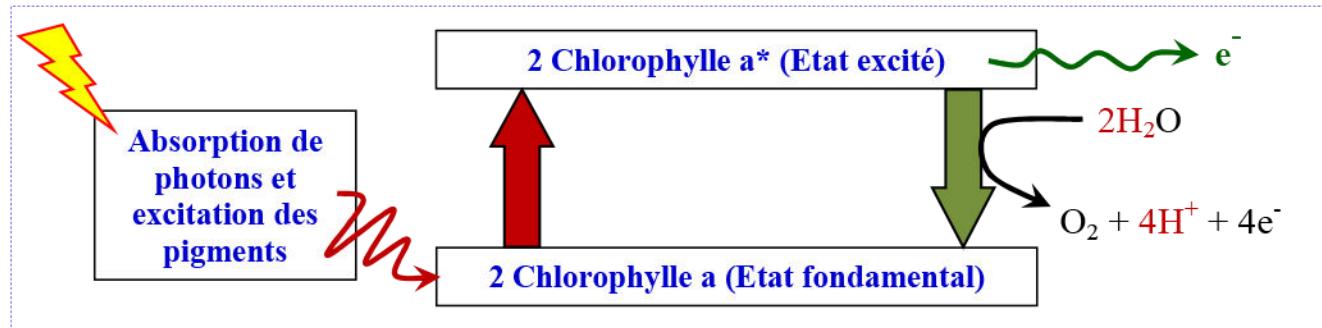
- ✓ L'ATP est un composé phosphorylé riche en énergie ;
- ✓ L'hydrolyse d'une molécule d'ATP, catalysée par l'enzyme ATPase, produit une quantité d'énergie avec production d'une molécule d'adénosine diphosphate (ADP) et d'une molécule de phosphate inorganique (Pi) ;
- ✓ La synthèse de l'ATP par phosphorylation de l'ADP, est catalysée par l'enzyme ATPsynthase, composée des sphères pédonculées. Cette réaction nécessite de l'énergie (réaction dite endergonique).

- 3) Proposez une hypothèse sur l'origine de l'énergie nécessaire à la synthèse d'ATP.

- 1) Les électrons se déplacent spontanément d'un composant à faible potentiel redox, vers un autre à fort potentiel redox; Il y a libération d'énergie. En revanche les électrons ne peuvent pas se déplacer dans le sens inverse, sans apport externe d'énergie.

L'énergie lumineuse absorbée par l'antenne collectrice du photosystème (PS_{II}) est transmise à la chlorophylle (a) ce qui provoque une diminution de son potentiel redox ; autrement dit, l'augmentation de sa capacité à céder des électrons.

Une fois excitée, la chlorophylle (a) devient très oxydante et accepte les électrons issus de la photolyse de l'eau pour récupérer son état initiale.



Il existe en fait une série de couples redox qui transfèrent successivement les électrons depuis la chlorophylle (a) du photosystème (PS_{II}), jusqu'à l'accepteur final d'électrons qui est le NADP⁺:



- 2) On constate que le nombre de moles synthétisés augmente proportionnellement avec l'augmentation de l'activité photosynthétique. On peut en conclure que l'activité photosynthétique s'accompagne de la production d'un composé énergétique appelé ATP.
- 3) Lorsque les électrons se déplacent de PS_{II} ou P680 vers PS_I ou P700, l'enzyme E₂ exploite une partie de l'énergie libérée pour pomper les protons H⁺ du stroma vers la cavité du thylakoïde, ce qui crée une différence de concentration de H⁺ et une différence de pH entre le stroma et le

lumen du thylakoïde, car la membrane du thylakoïde est imperméable aux protons. Cette différence de concentration de H⁺ est appelée gradient de H⁺.

Poussés par le gradient électrochimique, les ions H⁺ rejoignent le stroma en traversant les sphères pédonculées qui sont de l'ATP synthase.

On peut donc penser que le flux de protons de la cavité du thylakoïde vers le stroma, à travers les sphères pédonculées, qui libère l'énergie utilisée pour la synthèse d'ATP.

⇒ **Conditions de synthèse de l'ATP:**

Pour déterminer le rôle du gradient H⁺ dans la phosphorylation de l'ADP en ATP, on réalise les expériences présentées par le document 11 :

Document 11: Les conditions de synthèse de l'ATP:

Pour déterminer les conditions et les éléments nécessaires à la synthèse des molécules d'ATP au niveau des chloroplastes, on réalise l'expérience dont les conditions et les résultats figurent sur le tableau suivant :

Expériences	Concentration H ⁺ (mol/l)		Sphères pédonculée	ADP et Pi	Résultats
	Stroma	Thylakoïde			
1	10 ⁻⁸ (pH=8)	10 ⁻⁴ (pH=4)	Présence	Présence	Synthèse d'ATP
2	10 ⁻⁷ (pH=7)	10 ⁻⁷ (pH=7)	Présence	Présence	Pas de synthèse d'ATP
3	10 ⁻⁸ (pH=8)	10 ⁻⁴ (pH=4)	Absence	Présence	Pas de synthèse d'ATP
4	10 ⁻⁸ (pH=8)	10 ⁻⁴ (pH=4)	Présence	Absence	Pas de synthèse d'ATP

En exploitant les données de ce document, vérifiez l'hypothèse suivante :

«Le flux de protons de la cavité du thylakoïde vers le stroma, à travers les sphères pédonculées, qui libère l'énergie utilisée pour la synthèse d'ATP».

On constate que la synthèse de l'ATP ne se fait que dans le milieu 1, où il y'a présence des sphères pédonculés et l'ADP + Pi et où la concentration en H⁺ est élevée dans le milieu intérieur des thylacoïde par rapport au stroma.

Le gradient de protons H⁺ crée un flux de protons qui s'effectue de la cavité du thylakoïde vers le stroma à travers les sphères pédonculées. Ce flux entraîne la libération d'une énergie (Energie potentielle du gradient) et l'activation des sphères pédonculées qui sont des ATPsynthase et qui utilisent l'énergie libérée pour la photophosphorylation de l'ADP en ATP.

Ainsi, au cours de la phase claire de la photosynthèse, l'énergie lumineuse est convertie en énergie chimique (ATP et NADPH, H⁺).

b) Les réactions de la phase biochimique « sombre »:

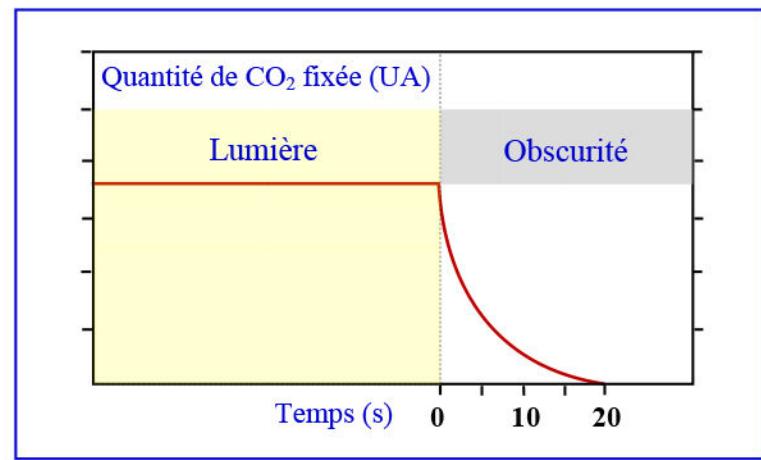
⇒ **Dépendance des deux phases de la photosynthèse:** (Voir document 12).

Document 12: Dépendance des deux phases de la photosynthèse:

★ Expérience de Gaffron, 1951 :

Du dioxyde de carbone radioactif ($^{14}\text{CO}_2$) est fourni à une suspension d'algues verte unicellulaires (chlorelles) fortement éclairée pendant au moins 20 min puis mise à l'obscurité. On mesure la quantité de molécules organiques élaborées à partir du $^{14}\text{CO}_2$ par les algues au cours de l'expérience.

Le résultat de cette expérience est présenté par la figure ci-contre.



★ Expérience d'Arnon, 1958 :

Les expériences sont 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 CO_2 fixée dans le stroma en coups/min. Le résultat de cette expérience est présenté par le tableau ci-dessous :

Conditions expérimentales	Radioactivité (en coups/min)
Stroma laissé à l'obscurité en présence de 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 CO_2 radioactif	96 000
Stroma laissé à l'obscurité en présence de CO_2 radioactif, d'ATP et de NADPH, H^+ .	97 000

A partir de l'exploitation des données de ce document, montrez que la fixation du CO_2 dans des molécules organiques lors de la photosynthèse ne dépend pas directement, mais indirectement, de l'utilisation de la lumière.

★ Expérience de Gaffron :

La fixation de CO_2 dans des molécules organiques :

- Diminue puis cesse au bout de 20 secondes à l'obscurité : elle dépend de la lumière ;
- Elle se maintient durant 20 secondes : la dépendance à la lumière n'est pas directe.

★ Expérience d'Arnon :

- Dans le stroma à l'obscurité la fixation de CO_2 est réduite ;
- Dans le stroma à l'obscurité + thylakoïdes ayant été éclairés la fixation de CO_2 est importante : les thylakoïdes éclairés fournissent au stroma des éléments permettant la fixation du CO_2 ;
- Dans le stroma à l'obscurité + ATP et NADPH, H^+ , la fixation de CO_2 est importante: les éléments fournis par les thylakoïdes peuvent être ATP et NADPH, H^+ .

La fixation du CO_2 dans des molécules organiques se fait dans le stroma à partir d'ATP et de NADPH, H^+ (phase biochimique) produits par les thylakoïdes éclairés (phase photochimique). Elle dépend donc de la lumière, mais indirectement.

⇒ Devenir du CO₂ absorbé par les plantes chlorophylliennes :

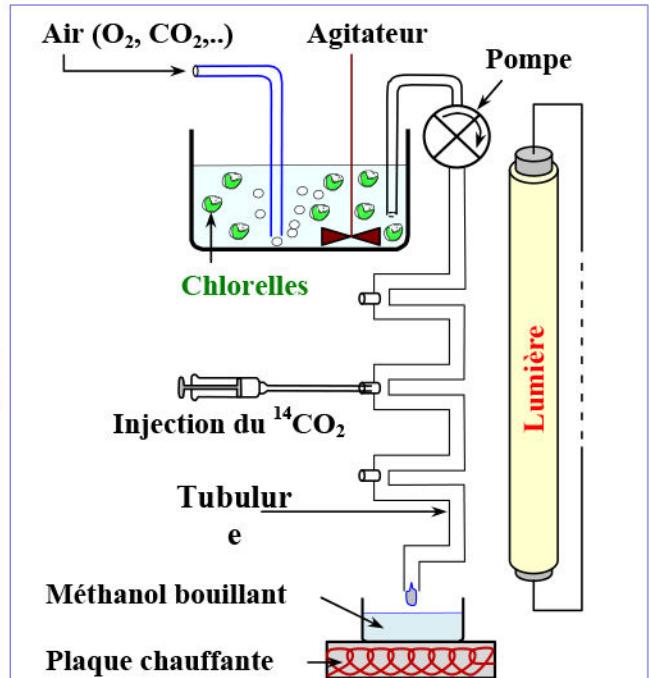
Pour connaître la nature des premiers composés organiques fabriqués au cours de la photosynthèse, Calvin et ses collaborateurs ont réalisés les expériences présentées par le document 13 :

Document 13: Devenir du CO₂ absorbé par les plantes chlorophylliennes:

★ Expérience de Calvin et Benson, 1962 :

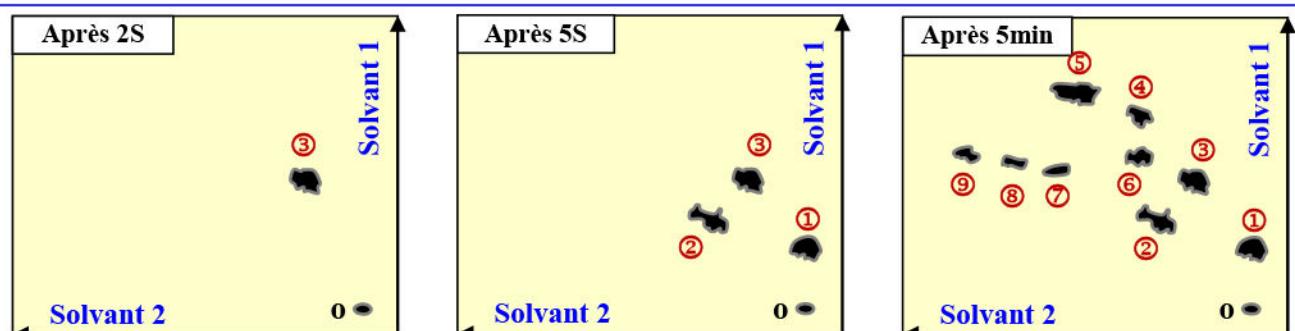
On met des chlorelles dans un milieu riche en CO₂, et bien éclairé. Une pompe permet de propulser la suspension dans un tube fin. Dans ce tube, on peut injecter à chaque moment, et en des points différents, du CO₂ radioactif marqué au ¹⁴C. Après avoir traversé le tube, les chlorelles finissent dans de l'éthanol bouillant; ce qui va stopper toutes les réactions métaboliques. En effet, la chaleur dénature les enzymes. Le choix du point d'injection du ¹⁴C, et la force de la pompe, déterminent la durée d'exposition des cellules au ¹⁴C. Cette durée varie entre 1s et plusieurs minutes (Figure ci-contre).

Les chlorelles fixent le CO₂ radioactif de la même manière que le CO₂ ordinaire. Les molécules organiques synthétisées seront aussi radioactives.



Après l'exposition au CO₂ radioactif, les cellules sont tuées. On procède ensuite à l'extraction des substances organiques contenues dans ces cellules. Le mélange des substances organiques subit la technique de la chromatographie bidimensionnelle. A la fin, le papier chromatographique est traité par autoradiographie. Chaque substance est représentée par une tache qui se caractérise par sa position sur le film photographique. On répète l'expérience plusieurs fois en variant la durée d'exposition des chlorelles au ¹⁴C: 2s; 5s et 5min.

Les résultats de cette expérience sont présentés par les chromatogrammes suivants :



O = Position initial; ① = RudiP = Ribulose diphosphate (Ribulose biphosphate : RubP) Sucre à 5C et à 2 phosphates; ② = Glycéraldéhyde phosphate (G3p) (composé en C3);
③ = APG: acide phosphoglycérique (composé en C3) ; ④ = Acide pyruvique ; ⑤ = Acide malique ;
⑥ = Acide aspartique ; ⑦ = Sérine ; ⑧ = Glycine ; ⑨ = Alanine.

- 1) Pour séparer les pigments chlorophylliens, on procède à la chromatographie simple; mais dans l'expérience de Calvin, on avait recours à la chromatographie bidimensionnelle. Pouvez-vous justifier cette différence?
- 2) A partir des données de ce document, indiquez la première substance qui résulte de la fixation du CO₂ puis donnez la succession des produits qui apparaissent.

- 1) La chromatographie bidimensionnelle permet de séparer les espèces moléculaires qui constituent un mélange donné. Elle résulte du couplage de deux séparations chromatographiques de nature différente dans le but de séparer des mélanges complexes de substances similaires. Ainsi, le but principal de la chromatographie bidimensionnelle est l'augmentation de la capacité de séparation.
- 2) Après 2 secondes au contact de CO_2 radioactif, on n'observe que de l'APG (acide phosphoglycérique) dans la chromatographie bidimensionnelle. L'APG, composé en C₃, est donc la première molécule organique formée à partir de la fixation du CO_2 .

Les plantes dont le premier produit carboné de la photosynthèse est l'APG sont appelées plantes C₃.

Après l'APG apparaissent successivement :

- ✓ Le Glycéraldéhyde phosphate (G3p), le plus petit sucre simple à 3 carbones, il résulte de la réduction de l'APG.
- ✓ Le rubilose diphosphate (RudiP) : un sucre du stroma à 5 carbones.
- ✓ Différents types de produits organiques, sucres, des acides organiques (acide malique), différents acides aminés.

Donc Toutes les molécules organiques produites par la photosynthèse dérivent de l'APG

Comme de nouveaux produits sont apparus et que la surface de la tache de PGA n'a pas changé, il s'agit sans doute d'un intermédiaire central du métabolisme du carbone.

⇒ **Mécanismes d'incorporation du CO_2 dans les substances organiques:**
(Voir document 14).

Document 14: Expériences de Bassham et Calvin:

Des chlorelles sont cultivées dans un milieu où l'influence de deux paramètres est testée : la lumière et la présence de CO_2 . On barbote de l'air enrichi en CO_2 radioactif puis on mesure au cours du temps la concentration en APG et en C₅P₂ (RuBP). Les concentrations sont déduites de la radioactivité mesurée.

★ Expérience 1 : Des chlorelles sont cultivées dans un milieu éclairé en permanence. On suit la radioactivité de deux composés (RuBP et APG), en présence de CO_2 (1% de CO_2), puis en l'absence de CO_2 (0% de CO_2). La figure 1, présente les résultats de cette expérience.

★ Expérience 2 : Des chlorelles sont cultivées dans un milieu où barbote de l'air enrichi en $^{14}\text{CO}_2$ d'une façon constante. La culture normalement éclairée pendant 30 minutes est ensuite transférée à l'obscurité. En plus de la RuBP et APG, on mesure également la concentration en hexoses. La figure 2, présente les résultats de cette expérience.

En exploitant les résultats de l'expérience 1 et l'expérience 2 et de vos connaissances :

- 1) Expliquez comment et où s'effectue la fixation du CO_2 au cours de la photosynthèse.
- 2) Expliquez comment ces expériences conduisent à l'idée d'un couplage entre la phase photochimique, génératrice d'énergie, et la phase chimique utilisatrice d'énergie.

Document 14: (Suite):

Figure 1 : Expérience 1

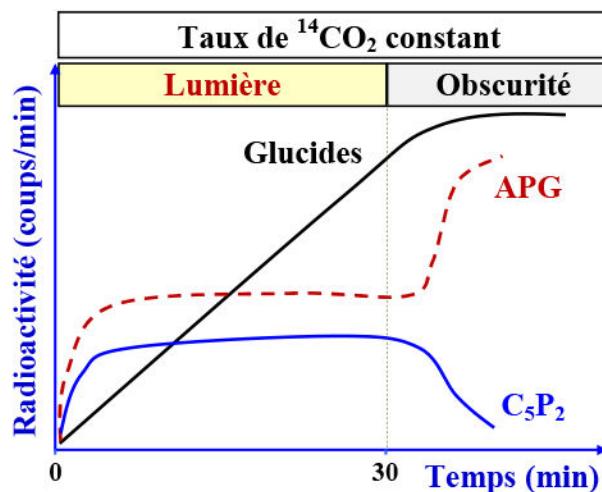
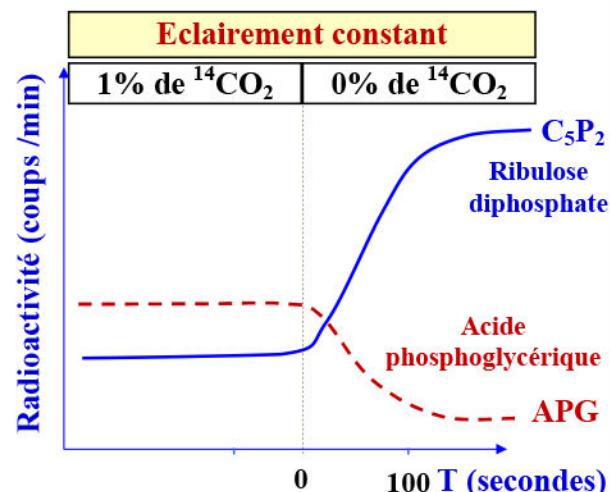


Figure 2 : Expérience 2



★ Expérience 1 : La Rubis CO (Ribulose biphosphate carboxylase oxygénase) est une enzyme qui catalyse certaines réactions chimiques spécifiques des végétaux chlorophylliens.

Des chlorelles, sont cultivées dans un milieu où barbote de l'air enrichi en CO₂ radioactif, la culture est éclairée en présence ou en absence de la Rubis CO.

On mesure au cours du temps les concentrations en APG et en RuBP. Les concentrations sont déduites de la radioactivité mesurée. La figure 3, présente les résultats de cette expérience.

- 3) Analysez ces résultats et déduisez le rôle de la Rubis CO.

- 1) Où s'effectue la fixation du CO₂ au cours de la photosynthèse ?

★ Expérience 1 (figure 1) : En présence de lumière et CO₂, les quantités de C₅P₂ et d'APG sont stables et la quantité d'hexoses augmente.

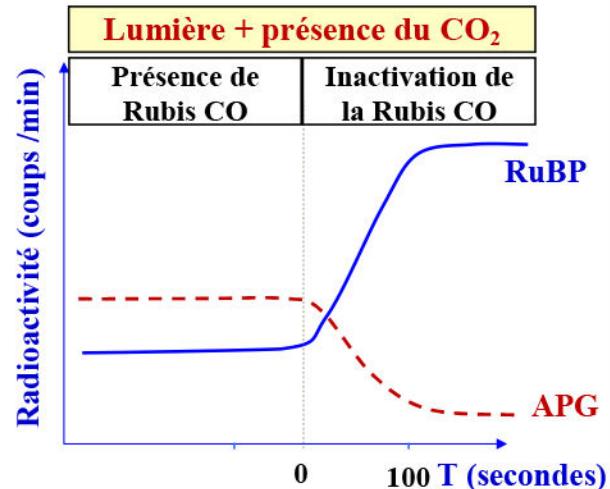
A l'obscurité et toujours en présence de CO₂, le ribulose diphosphate (RuBP) disparaît progressivement et l'acide phosphoglycélique (APG) s'accumule. De plus, la synthèse des hexoses cesse.

On déduit de ces résultats que la formation du ribulose diphosphate et la synthèse des hexoses s'effectue à partir de l'acide phosphoglycélique et nécessite la présence du CO₂ et la lumière.

★ Expérience 2 (figure 2) : En absence de CO₂ (et en présence de lumière), l'acide phosphoglycélique disparaît progressivement et le ribulose diphosphate s'accumule.

On déduit de ces résultats que l'acide phosphorique est formé à partir de la fixation de CO₂ sur le ribulose diphosphate.

Figure 3 : Expérience 3



2) Le renouvellement du rubilose diphosphate et la synthèse des hexoses s'effectue à partir de l'acide phosphoglycérique et nécessite la présence de molécules produites lors de la phase photochimique. Il s'agit de l'ATP et de NADPH, H⁺.

Une molécule de rubilose diphosphate (possédant 5 atomes de carbone) et une molécule de CO₂ donnent deux molécules d'acide phosphoglycélique (3 atomes de carbone).

Les 2 réactions de la photosynthèse sont donc bien couplées :

- ✓ La phase photochimique produit de l'ATP et un transporteur réduit (NADPH, H⁺).
- ✓ La phase biochimique utilise ces intermédiaires (ATP + NADPH, H⁺) pour fixer le CO₂.

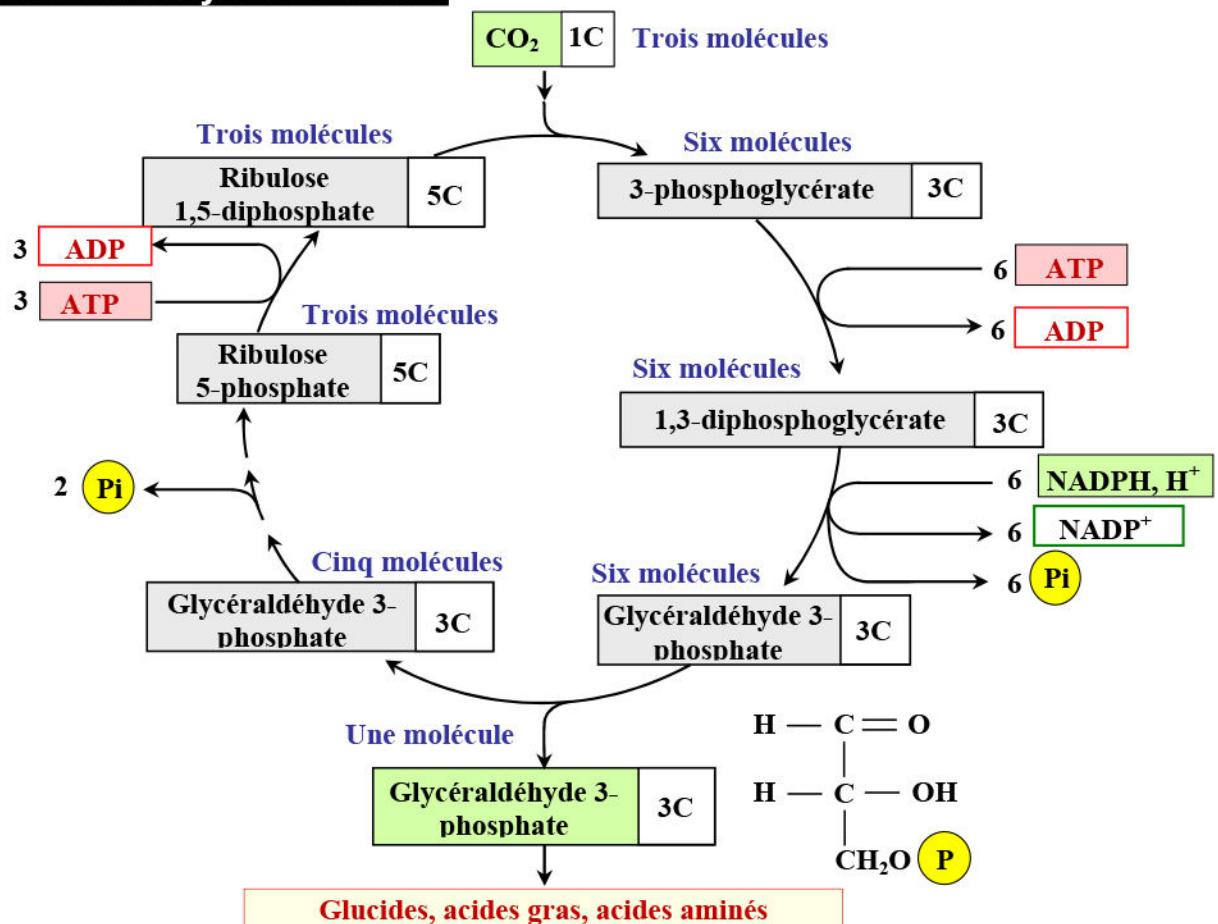
3) Expérience 3 (figure 3) : En inactivant la Rubis CO, l'acide phosphoglycélique disparaît progressivement et le rubilose diphosphate s'accumule.

On déduit de ces résultats que la Rubis CO est l'enzyme qui intervient dans la fixation de CO₂ sur le rubilose diphosphate pour donner l'acide phosphorique.

⇒ Réactions de la phase biochimique (Sombre) :

Au niveau du stroma se trouve le RuBP sucre phosphaté à C₅, et un enzyme : la Rubis CO qui catalyse la réaction de carboxylation du RuBP par le CO₂. Ainsi se fait la fixation du CO₂ pour la synthèse de la matière organique, indépendamment de la lumière, en une série de réactions constituant le cycle de Calvin (Voir document 15).

Document 15: Le cycle de Calvin



Document 15: (Suite):

Le cycle de Calvin peut être divisé en trois étapes essentielles (Voir figure ci-contre):

★ L'incorporation du CO₂ dans le RuBP (①):

Cette réaction est catalysée par la RubisCO qui incorpore une molécule de CO₂ dans un composé en C5 (RuBP) pour donner deux molécules d'un composé en C3, l'acide phosphoglycérique (APG).

★ La réduction de l'APG en triose phosphate (G3P) (②):

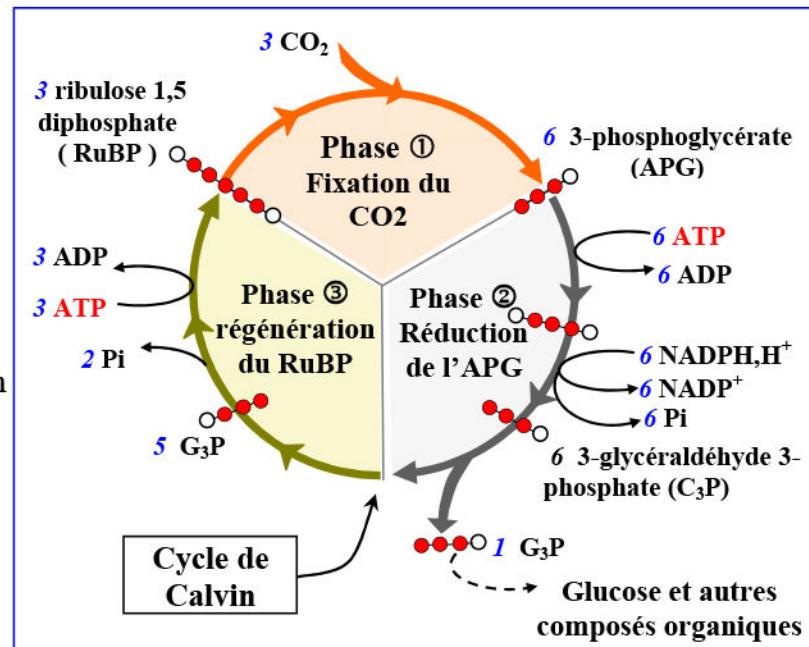
La formation de 2 molécules de trioses nécessite deux molécules d'ATP et 2 molécules de NADPH, H⁺.

★ La régénération du RuBP (③):

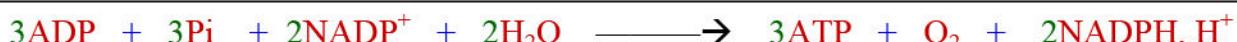
Le G3P formé peut avoir différentes destinées, un sixième de celui-ci sera utilisé par la cellule comme composant glucidique et les cinq sixièmes restant seront utilisés pour régénérer la RuBP et poursuivre le cycle de Calvin.

La régénération du RuBP nécessite une molécule d'ATP supplémentaire par molécule de CO₂ fixé.

En se basant sur les données de ce document, écrire la réaction globale de la synthèse du glucose C₆H₁₂O₆.

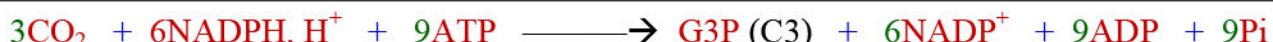


★ Bilan de la phase photochimique :



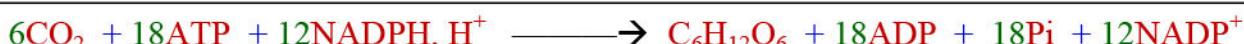
★ Bilan de la phase biochimique :

A chaque tour de cycle de Calvin, l'assimilation d'une molécule de CO₂ exige la consommation de 3 ATP et 2 molécules de NADPH, H⁺:



★ La réaction globale de la synthèse d'une molécule de glucose est :

La production d'une molécule de glucose C₆H₁₂O₆ nécessite la fixation de 6 molécules de CO₂, soit 6 tours de cycle, elle consomme donc 18 molécules d'ATP et 12 NADPH, H⁺:



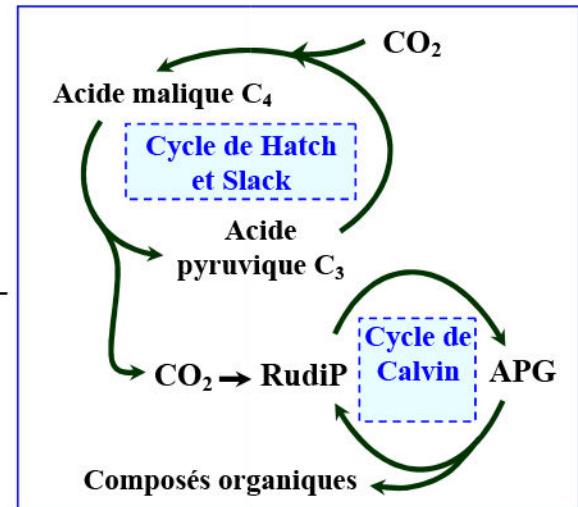
Remarque : (Voir document 16)

Document 16: Incorporation du CO₂ chez les plantes en C4:

Les crassulacées constituent une famille de plantes adaptées à la vie dans les zones sèches et chaudes. Chez les crassulacées et les plantes en C4, comme le maïs et la canne à sucre, les stomates ne peuvent s'ouvrir que la nuit pour éviter la perte d'eau; ainsi, ces plantes absorbent le CO₂ la nuit. Ce CO₂ réagit avec l'acide pyruvique à 3C pour donner l'acide malique à 4C qui s'accumule, ainsi le premier produit de l'incorporation du CO₂ est à 4C d'où le nom de plantes en C4 (Figure ci-contre).

Pendant le jour, la réaction inverse se produit, le CO₂ libéré entre dans le cycle de Calvin en présence des produits de la phase claire.

En se basant sur ces données, dégagiez les caractéristiques des plantes en C4.



En plus des plantes en C3, il existe des plantes nommées plantes en C4, ce sont des plantes des zones arides très chaudes le jour. Elles sont caractérisées par leur capacité à retenir une quantité importante d'eau.

Chez les crassulacées et les plantes en C4, après avoir fixé le CO₂, le premier produit organique de la photosynthèse est un composé constitué de 4 atomes de carbones, d'où le nom de plante en C4.

Le jour, le CO₂ est libéré des composés en C4 formés la nuit et rejoint le cycle de Calvin qui aboutit à la synthèse des différentes substances organiques.

III – Diversité des sources de la matière et de l'énergie utilisées par les êtres vivants:

① La chimiosynthèse : (Voir le document 17)

Document 17: La chimiosynthèse:

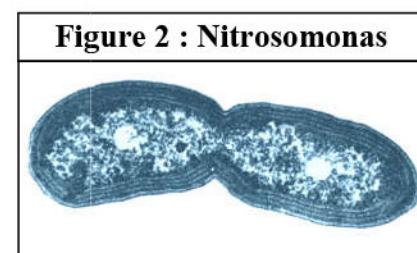
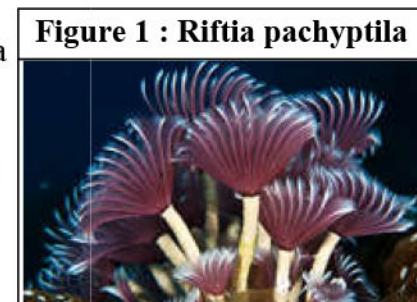
Dans les grands fonds marins, au voisinage des dorsales océaniques, des chercheurs ont découvert l'existence de vie animale aux alentours des sources hydrothermales, en absence de la lumière. Comme exemple, *Riftia pachyptila* (Figure 1), c'est un ver géant qui peut atteindre plus de 2 mètres. Il vit dans un tube de chitine qu'il sécrète. Ce ver vit en symbiose obligatoire avec des bactéries chimiosynthétiques qui utilisent l'énergie chimique contenue dans les fluides hydrothermaux que leur transmet le ver via son système sanguin. Il s'agit de bactéries Sulfo-oxydantes qui utilisent les molécules de sulfure d'hydrogène (H₂S), le dioxyde de carbone (CO₂), et de dioxygène (O₂) pour synthétiser des sucres que le ver peut assimiler.

La bactérie *Nitrosomonas* est un genre de bactérie chimiotrophe qui se rencontre dans le sol, les eaux usées, tout particulièrement dans les zones polluées qui contiennent de hauts niveaux de composés azotés (La figure 2).

Cette bactérie oxyde des substances minérales (NH₄⁺) pour tirer de l'énergie qui lui permet de synthétiser de la matière organique:



La bactérie *Nitrosomonas* utilise les électrons issus de l'oxydation d'ammoniac pour produire l'énergie.



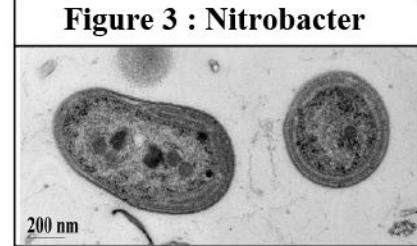
Document 17: (Suite):

Nitrobacter est un genre de bactérie, chimioautotrophe, qui se rencontre principalement dans les sols et les eaux usées. Elle joue un rôle important dans le cycle de l'azote en oxydant le nitrite (NO_2^-) en nitrate (NO_3^-) dans le sol (La figure 3).



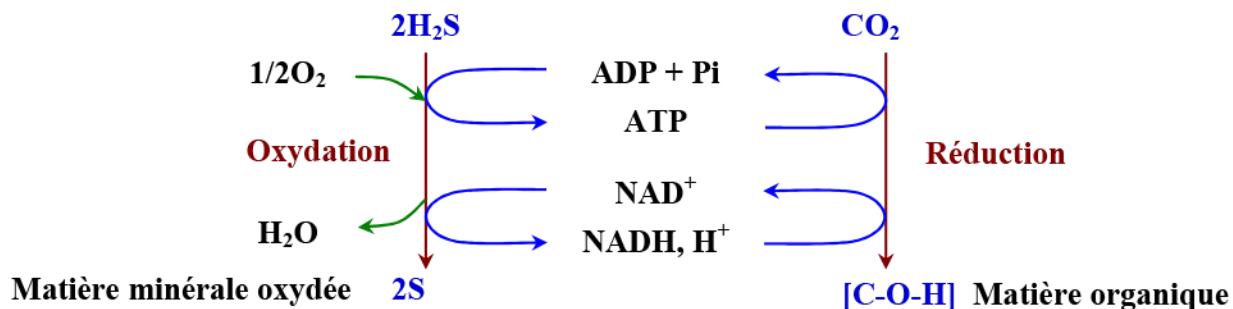
Les Nitrobacter utilisent l'énergie venant de l'oxydation des ions nitrite, en ions nitrate, pour répondre à leurs exigences en carbone.

En exploitant les données de ce document, déduire la source d'énergie utilisée par les bactéries vivants dans les dorsales océaniques, les Nitrosomonas et les nitrobacters.



On constate que les animaux présentés par ce document élaborent leur matière organique en utilisant la matière minérale uniquement, on parle de chimiosynthèse.

Exemple chez la bactérie Sulfo-oxydante qui vit en symbiose avec Riftia pachyptila :



② Diversité des sources de la matière et de l'énergie:

Selon le mode de nutrition, les organismes vivants peuvent être repartis en différents types trophiques :

Source d'énergie Source de matière	PHOTOTROPHES Energie lumineuse	CHIMIOTROPHES Energie chimique
AUTOTROPHES Matière minérale	PHOTOLITHOTROPHES Organismes chlorophylliens	CHIMIOLITHOTROPHES Bactérie nitrifiantes et sulfureuses
HETEROTROPHES Matière organique	PHOTOORGANOTROPHES certaines bactéries chlorophylliennes	CHIMIOORGANOTROPHES Animaux, champignons, bactéries