

PROJET FINAL DE
TRAVAUX PERSONNELS ENCADRÉS
(T.P.E.)

ÉPISODE I

I. L'ORIGINE DE LA FORCE : LES « MIDICHLORIENS »

SOLIGNAC Enzo

1^{ère} S 2

19/02/2019

I. L'ORIGINE DE LA FORCE : LES « MIDICHLORIENS »

Sur le plan étymologique, le mot « midichlorien » semble être le mélange des termes « mitochondrie » et « chloroplaste » qui sont deux organites, caractéristiques de la cellule eucaryote, ce qui est corroboré par la définition du midichlorien qui est, selon Qui-Gon Jinn : « [un midichlorien] est une forme de vie microscopique qui réside dans toutes les cellules vivantes ». Ces micro-organismes étant présents dans les cellules sont des organites tout comme la mitochondrie et le chloroplaste.

Ces midichloriens sont universels : ils sont présents dans tous les êtres vivants, mais leur nombre varie d'un être à l'autre. En effet, seuls les Jedi en ont suffisamment pour contrôler la Force et pour déterminer si un être face à eux en a suffisamment pour devenir un Jedi.

Le chloroplaste et la mitochondrie étant deux organites, ils sont indispensables à la vie des cellules eucaryotes : sans eux, « la vie n'existerait pas » (pour cette famille de cellules) comme l'a précisé le mentor d'Obi-Wan à propos de ces midichloriens.

Nous allons ainsi nous demander si l'existence d'un micro-organisme résultant de la fusion entre une mitochondrie et un chloroplaste au sein d'une cellule serait possible, quels en seraient les intérêts et est-ce qu'il permettrait le contrôle du champ électromagnétique externe pour créer une interaction à distance sur un objet.

Pour répondre à cela, dans un premier temps, nous définirons ce qu'est une cellule, ensuite nous déterminerons l'utilité des deux organites cités précédemment et enfin nous émettrons des hypothèses sur la fusion de ces derniers.

Qui-Gon Jinn, le mentor d'Obi-Wan Kenobi (épisode I)



SOURCES : <https://www.starwars-universe.com/personnage-35-qui-gon-jinn.html>

Obi-Wan Kenobi (épisode V)



SOURCES :
https://www.google.fr/search?q=obi+wan+%C3%A9pisode+5&sa=X&biw=1280&bih=578&tbm=isch&source=iu&ictx=1&fir=SQ47sSj100qIAM%253A%252C8S94g5_gQUZWCM%252C%252Fm%252F0fkm7&usq=AI4_-kSAOd29STR8YiKb3Ij7VL224jusFg&ved=2ahUKEwsneeqh8HgAhUM3uAKHS4RA-sQ_B0wGHoECAUQBg#imgsrc=SQ47sSj100qIAM:

A. LA CELLULE

L'organisation d'un être vivant se définit à différentes échelles : il est constitué d'organes spécialisés, eux-mêmes constitués de cellules, observables au microscope dont la taille varie de quelques micromètres (μm) (pour les globules rouges) à quelques centimètres de longueur (pour les cellules musculaires) pour les cellules animales et végétales. Ces cellules sont constituées d'innombrables molécules (de quelques nanomètres).

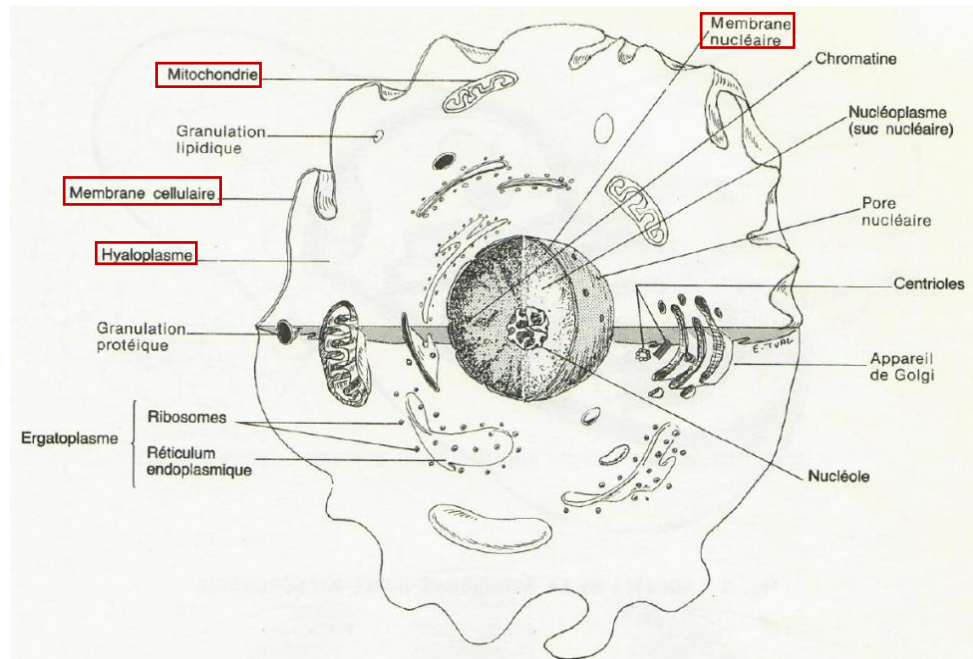
La cellule est l'unité structurale du vivant et elle échange en permanence de la matière et de l'énergie avec son milieu.

Les êtres vivants les plus simples sont composés d'une seule cellule : on leur attribue le nom d'être **unicellulaire** comme la chlorelle (une algue). Les êtres vivants qui possèdent plus d'une cellule sont ainsi appelés êtres **pluricellulaires** comme l'Homme.

On distingue 2 types de cellules : les cellules **procaryotes**, qui ne possèdent pas d'**organites**, et les cellules **eucaryotes**, qui en possèdent. Ces organites sont des compartiments cellulaires qui assurent une fonction précise au sein de la cellule (comme le noyau qui contient une molécule appelée **A.D.N.** (**A**cide **D**ésoxyribo**n**ucléique, molécule constituant les chromosomes et porteuse de l'information génétique d'une cellule)). Il existe de nombreuses cellules, toutes différentes, mais leur structure est commune. En effet, cellules eucaryotes comme procaryotes présentent une **membrane plasmique**, aussi appelée **membrane cellulaire**, qui entoure la cellule, la séparant du milieu extérieur dit **extracellulaire**, les protégeant et contrôlant l'entrée de substances et la sortie de déchets grâce à des pores (les cellules eucaryotes végétales possèdent en plus une **paroi cellulaire** (aussi appelée **paroi végétale**)). A l'intérieur de la cellule, on trouve le **cytosquelette**, un réseau de plusieurs sortes de filaments (chacun étant constitué de différentes protéines), qui sert à maintenir la forme de la cellule et à assurer ses mouvements internes et sa plasticité. On retrouve ensuite un milieu réactionnel, le **hyaloplasme** (ou **cytosol**), qui représente toute la partie liquide de la cellule, constituée entre 80% et 85% d'eau, qui a un pH neutre, dans laquelle baignent les organites (dans le cas des cellules eucaryotes) ou le matériel génétique seul (dans le cas des cellules procaryotes). L'ensemble du cytosquelette et du hyaloplasme (ou cytosol) constitue le **cytoplasme** qui représente donc tout ce qui est compris à l'intérieur de la membrane cellulaire (dans le cas de la cellule procaryote) ou entre la membrane plasmique et la **membrane nucléaire** du noyau (dans le cas de la cellule eucaryote).

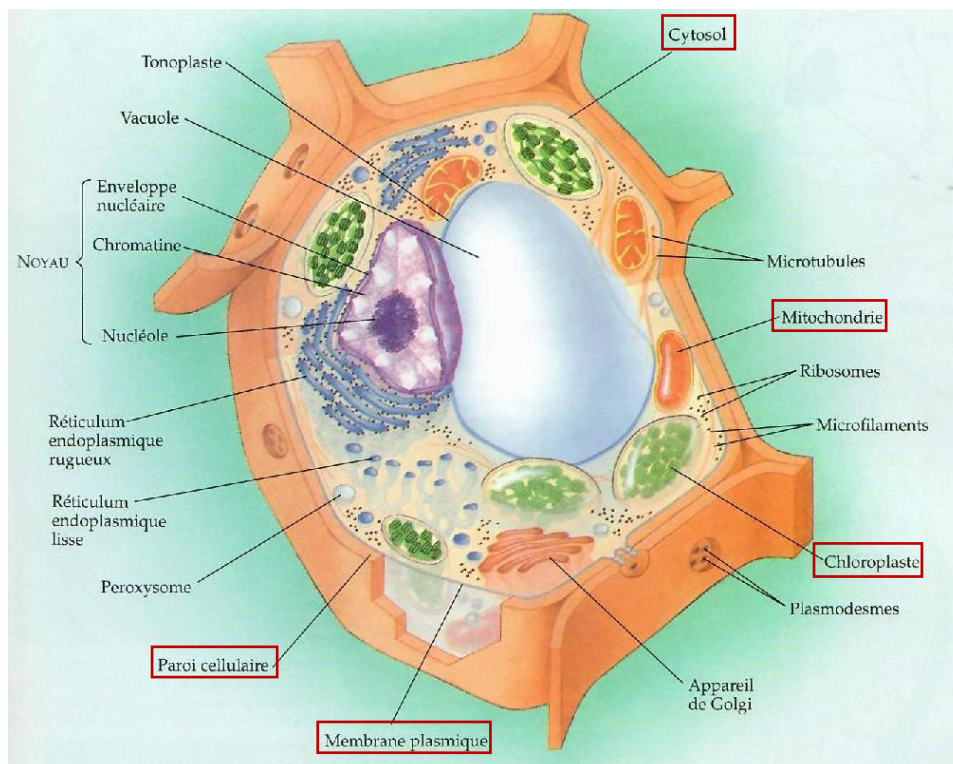
Comme nous l'avons dit précédemment, on distingue, uniquement dans le cas des cellules eucaryotes, de nombreux organites tels que la vacuole, le lysosome et bien d'autres. Ceux que nous allons étudier sont donc le **chloroplaste** et la **mitochondrie**.

Schéma présentant la structure interne d'une cellule eucaryote animale (ni sanguine ni reproductrice)



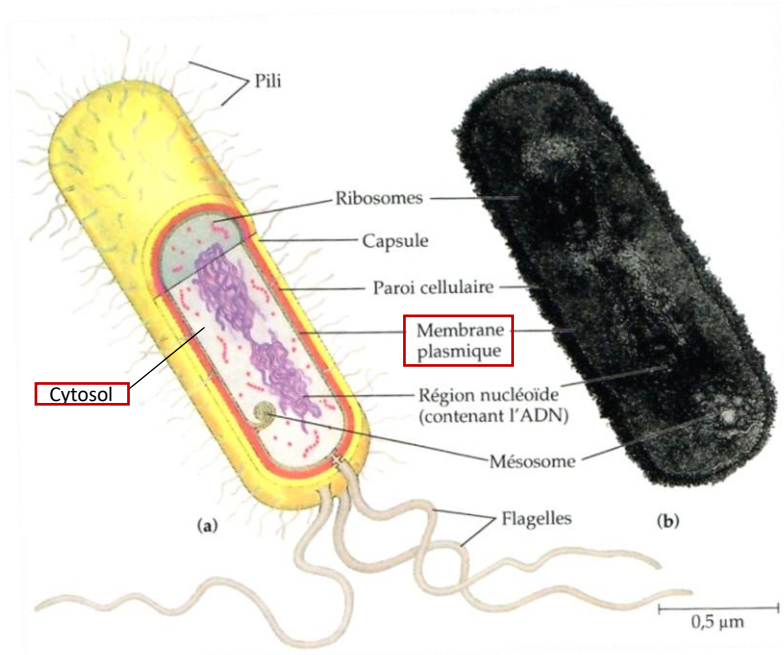
SOURCES : Lacombe, Michel. Précis d'anatomie et de physiologie humaines, atlas 26^e édition, préparation au Diplôme d'Etat d'Infirmières et aux professions paramédicales. Lamarre, 1989, ISBN : 2-85030-048-9, p. 7

Schéma présentant la structure interne d'une cellule eucaryote végétale chlorophyllienne



SOURCES : Campbell, N.A.. Biologie, adaptation et révision scientifique de Richard Mathieu. De Boeck Université, 1995, ISBN DE BOECK : 2-8041-2084-8, ISBN ERPI : 2-7613-0653-8, p. 125

Schéma présentant la structure interne d'une cellule bactérienne (cellule procaryote)



SOURCES : Campbell, N.A.. *Biologie, adaptation et révision scientifique* de Richard Mathieu. De Boeck Université, 1995, ISBN DE BOECK : 2-8041-2084-8, ISBN ERPI : 2-7613-0653-8, p. 121

B. LE CHLOROPLASTE

Comme nous l'avons vu, le chloroplaste est un organite uniquement présent dans les cellules eucaryotes, et plus précisément dans les cellules eucaryotes végétales chlorophylliennes. Il n'est donc pas contenu dans les cellules eucaryotes animales telles que les hématies (globules rouges) ou les cellules musculaires chez l'Homme. Etant un organite, il assure une fonction précise : la **photosynthèse**.

Photographies de cellules d'un rameau mises en contact avec de l'eau iodée et placées dans différents milieux avec différentes conditions lumineuses (observations au microscope optique)

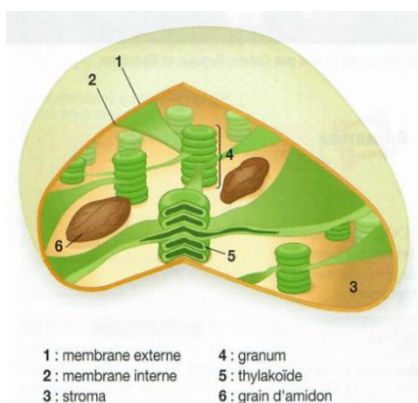


SOURCES : Manuel SVT T^{erm} S enseignement de spécialité SVT programme 2012. Bordas, 2012, ISBN : 978-2-04-732930-6, p. 16

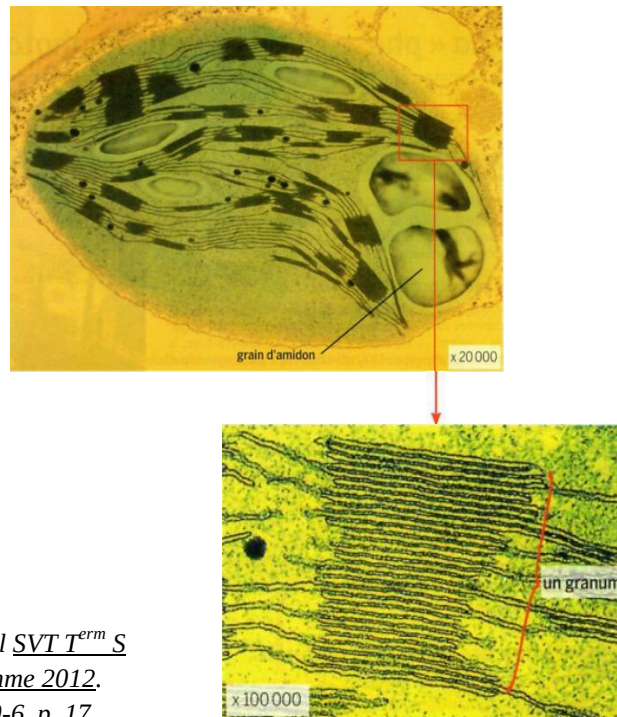
1. Structure interne

Le chloroplaste possède une structure bien définie. En effet, cet organite ovoïde, dont la taille est comprise entre 1 et 4 micromètres (μm) d'épaisseur et de 3 à 10 μm de longueur, est délimité par une double membrane plasmique dont la membrane interne forme de nombreux replis formant des « sacs » empilés appelés **thylakoïdes**. On appelle **granum** un empilement de plusieurs thylakoïdes. Dans les membranes de ces derniers sont renfermées des molécules de **chlorophylle** (qui donnent entre autres leur couleur verte aux végétaux chlorophylliens). On trouve également dans tout le chloroplaste une substance, un fluide incolore, appelé **stroma** et, parfois, des grains d'**amidon**.

Schéma présentant la structure interne d'un chloroplaste



Photographie d'un chloroplaste observé au Microscope
Électronique à Transmission (MET)



*SOURCES DES 3 DOCUMENTS : Manuel SVT T^{erm} S
enseignement de spécialité SVT programme 2012.
Bordas, 2012, ISBN : 978-2-04-732930-6, p. 17*

2. La photosynthèse

2.1. Définitions

La **photosynthèse** est un processus de **réduction*** du dioxyde de carbone (CO_2) de l'air et d'**oxydation*** de l'eau (H_2O) en molécule organique, notamment de glucides, d'acides aminés et d'acides organiques réalisé par les végétaux chlorophylliens. Ce processus se déroule en deux phases (chacune dans un lieu différent du chloroplaste) : la **phase photochimique**, qui a lieu dans les thylakoïdes, puis la **phase chimique**, qui a lieu dans le stroma.

La **réduction est une réaction chimique au cours de laquelle un oxydant capte des électrons afin de se transformer en un réducteur dit conjugué (elle concerne également une désoxygénation ou une hydrogénation).*

L'oxydation** est une réaction chimique au cours de laquelle un réducteur cède des électrons afin de se transformer en un oxydant.*

*L'**oxydoréduction** est donc une réaction chimique au cours de laquelle il y a un transfert d'électrons entre deux entités chimiques pour produire de l'énergie : l'espèce chimique qui prend possession des électrons est appelée « oxydant » et l'espèce chimique qui les cède est appelée « réducteur ».*

Les **métabolites** sont des molécules qui participent au fonctionnement (ou qui sont issus) du **métabolisme*** de la cellule comme les nucléotides, le glucose, les acides aminés, ...

Le **métabolisme désigne l'ensemble des réactions de synthèse qui ont lieu dans la cellule.*

Une **molécule polymère** est une **macromolécule** (c'est-à-dire, un assemblage de plusieurs molécules afin d'obtenir une molécule ayant une masse moléculaire très élevée) constituée d'un assemblage de molécules unitaires identiques. Par exemple, l'amidon et le glycogène sont des polymères du glucose car ils sont constitués d'un assemblage de plusieurs molécules de glucose.

2.2. La phase photochimique de la photosynthèse

Dans les années 1930, **Robert Hill** met en avant le fait que la première étape de la photosynthèse, la phase photochimique, est une réaction d'oxydoréduction de l'eau et d'un composé hydrogéné, noté **RH₂** (nom générique avec « R » étant la notation simplifiée d'un composé, une molécule complexe, présent dans le cytoplasme ayant un pouvoir oxydant et assurant le transport de deux atomes d'hydrogène).

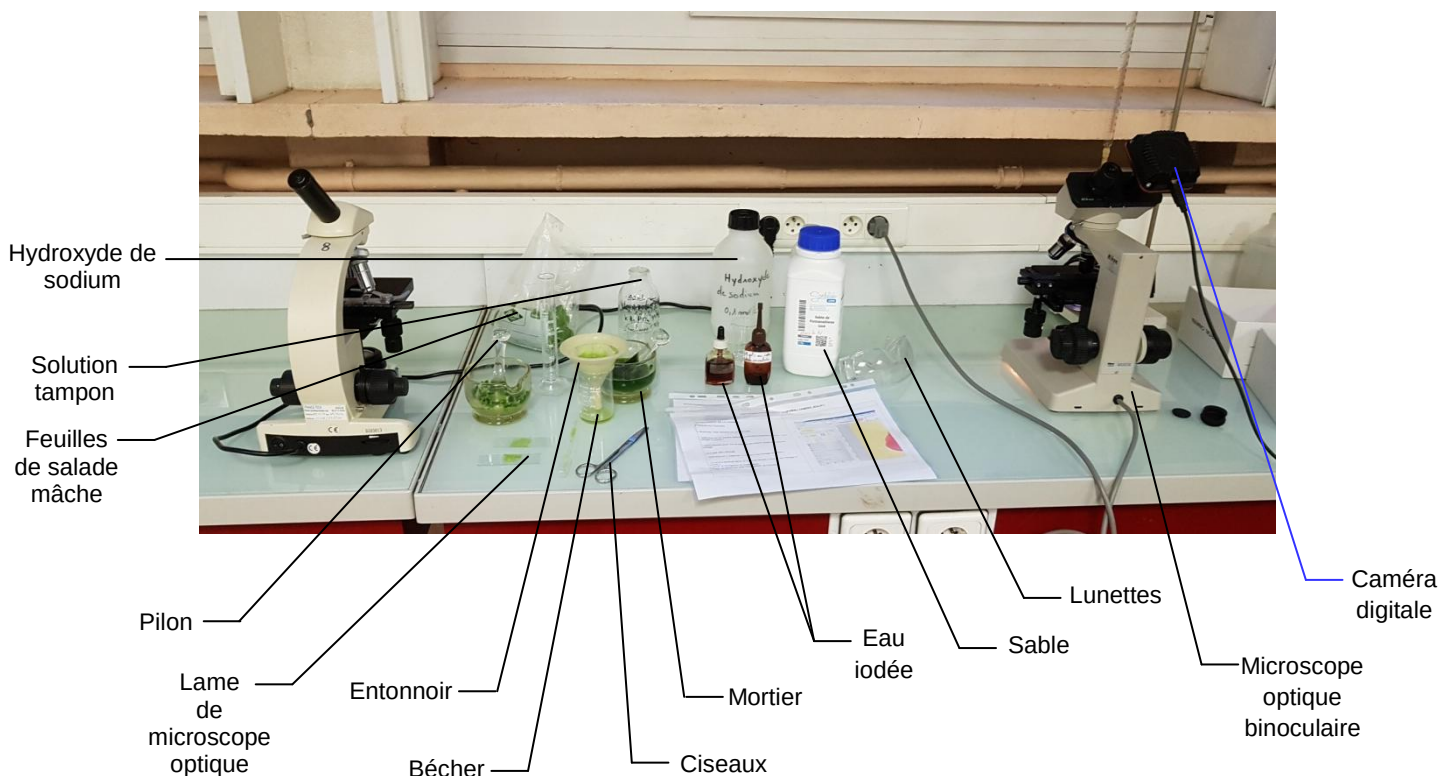
Nous allons donc isoler des chloroplastes contenus dans des feuilles de salade mâche fraîche dans le but de réaliser l'expérience réalisée par Hill afin de définir les conditions nécessaires au déroulement du processus de la photosynthèse, mais aussi de montrer ce qu'il se produit à l'issue de ce processus.

Hypothèse : nous savons déjà que la photosynthèse ne concerne que les cellules eucaryotes végétales chlorophylliennes et qu'il faut par conséquent la présence de chlorophylle, mais aussi d'eau et de dioxyde de carbone.

Nous pensons que ce processus se déroule en plus sous l'effet de la lumière et d'un réactif à pouvoir oxydant. Nous pensons également que ce processus produit du dioxygène (O₂) et de la matière organique.

Remarque : dans les expériences qui vont suivre, nous n'aurons pas besoin de rincer le matériel avec une solution particulière avant de pouvoir prélever cette même solution puisque le matériel sera déjà préalablement nettoyé, propre et les seringues en plastiques de 1 mL seront jetables (par exemple « rincer l'éprouvette graduée avec la solution tampon » ne sera donc pas nécessaire).

Photographies présentant le matériel utilisé pour les trois expériences qui vont suivre



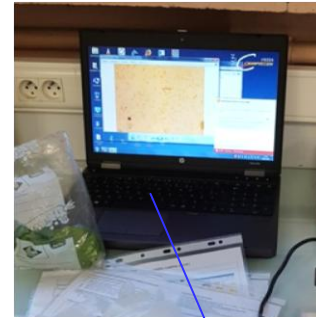


Interface USB link



Microscope
optique
binoculaire

Caméra
digitale



Ordinateur



Bioréacteur

Cache
métallique

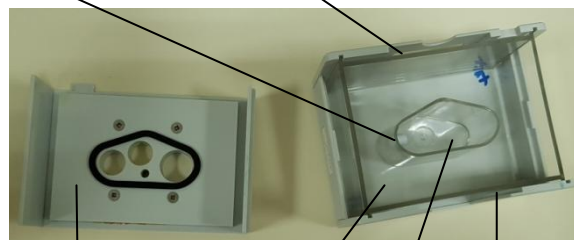


Lampe

Bouchons

Sonde
oxymétrique

Fente prévue pour
le cache métallique
Agitateur



Couvercle

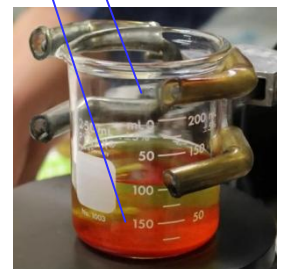
Cuve
externe

Cuve
interne

Fente prévue
pour la lampe

Solution d'hexacyanoferrate
de potassium

Bécher



SOURCES :
<http://tpecristaux.e-monsite.com/pages/2-synthetisation-par-l-homme/a-presentation-de-nos-experiences.html>

• EXPÉRIENCE N° 1 : ISOLEMENT DES CHLOROPLASTES

○ MATÉRIEL :

- des gants et des lunettes
- une seringue en plastique de 1 mL jetable
- un mortier et un pilon
- un réfrigérateur
- du sable
- 25 feuilles de salade mâche fraîche
- des ciseaux
- 2 béchers numérotés (un n° 1 et l'autre n° 2)
- une solution tampon (il s'agit d'une solution de phosphate-saccharose avec un pH de 6,5 (acide) afin de conserver la structure des chloroplastes ainsi que leurs constituants comme les enzymes par exemple du fait qu'elles ne sont actives que dans des milieux de température et de pH particuliers mais aussi la chlorophylle car elle n'est stable que dans des milieux donnés)
- de l'hydroxyde de sodium (NaOH) (pH basique) (avec une concentration de 0,1 mol/L)
- une pipette graduée de 10 mL
- une propipette
- un entonnoir
- une fiole de 50 mL
- un papier filtre (il s'agit de gaze et de coton hydrophile)
- une lame et une lamelle de microscope optique

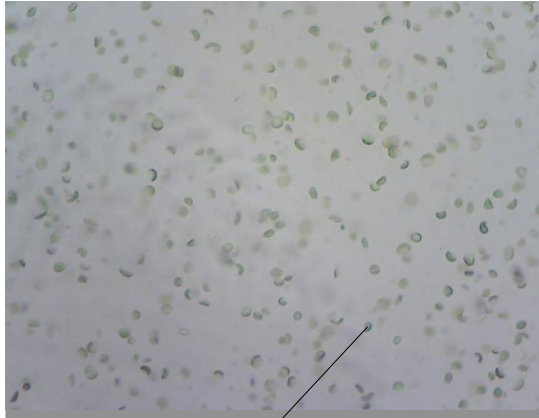
- un microscope optique binoculaire
- une caméra digitale (afin de prendre des photographies des chloroplastes observés au microscope optique)
- un ordinateur
- le logiciel ToupView (afin de voir les images prises par la caméra et les enregistrer)

○ **PROTOCOLE :**

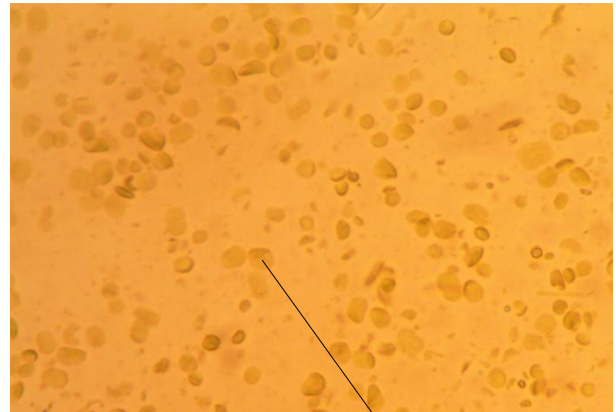
- placer le mortier, le pilon et l'éprouvette graduée dans le réfrigérateur pendant 15 minutes (afin de conserver la structure des chloroplastes ainsi que leurs constituants comme les enzymes car elles ne sont actives que dans des milieux de pH et de température donnés mais aussi la chlorophylle car elle n'est stable qu'en présence d'une certaine température au-delà de laquelle elle devient instable)
- sortir le mortier et le pilon du réfrigérateur
- se munir de lunettes et d'une paire de gants
- verser un peu de sable dans le mortier (afin de faciliter le broyage des feuilles de mâche fraîche mais aussi afin de casser la structure des cellules tout en protégeant les chloroplastes et leur structure) de telle sorte que le fond du mortier soit recouvert de sable
- couper en fines lamelles et dans le mortier les 25 feuilles de salade mâche fraîche à l'aide de ciseaux
- commencer à broyer, à l'aide du pilon, les morceaux de feuilles de salade mâche fraîche mélangées au sable
- verser 20 mL de solution tampon dans l'éprouvette graduée en veillant à ce que le bas du ménisque soit au niveau de la graduation des 20 mL
- ajouter les 20 mL de solution tampon contenus dans l'éprouvette graduée dans le mortier tout en broyant les feuilles de salade mâche fraîche mélangées au sable
- verser de l'hydroxyde de sodium dans le bécher n° 1
- munir la pipette graduée de 10 mL de la propipette
- prélever à l'aide de la pipette graduée les 10 mL d'hydroxyde de sodium contenus dans le bécher n° 1 en veillant à ce que le bas du ménisque soit au niveau de la graduation des 10 mL
- ajouter les 10 mL d'hydroxyde de sodium contenus dans la pipette graduée de 10 mL dans le mortier tout en broyant les feuilles de salade mâche fraîche mélangées au sable et à la solution tampon
- continuer de broyer fermement les feuilles de salade mâche fraîche mélangées au sable, à la solution tampon et à l'hydroxyde de sodium pendant 2 minutes (on obtient un « broyat » à l'issue du broyage)
- placer l'entonnoir dans la fiole
- déposer le papier filtre dans l'entonnoir, de telle sorte qu'il y ait entre 3 et 4 épaisseurs de papier filtre
- verser la totalité du broyat contenu dans le mortier dans le papier filtre
- envelopper le broyat à l'aide du papier filtre et le presser pour recueillir un maximum de filtrat
- verser le filtrat contenu dans la fiole dans le bécher n° 2
- déposer une goutte de filtrat sur une lame de microscope optique à l'aide d'une seringue en plastique de 1 mL puis monter entre lame et lamelle
- observer au microscope optique binoculaire la présence de chloroplastes dans le filtrat
- retirer l'oculaire du microscope optique et y introduire la caméra digitale
- brancher la caméra digitale à l'ordinateur
- ouvrir le logiciel ToupView et prendre des photographies via le logiciel

○ RÉSULTATS OBTENUS :

Deux photographies présentant les chloroplastes issus du filtrat et observés au microscope optique binoculaire (grossissement $\times 100$ pour la première photographie, et grossissement $\times 400$ pour la seconde)



un chloroplaste



un chloroplaste

• EXPÉRIENCE N° 2 : L'EXPÉRIENCE DE HILL

○ MATÉRIEL :

- une seringue en plastique de 1 mL
- un bécher
- de la solution d'hexacyanoferrate de potassium (il s'agit du « Réactif de Hill ») (très concentrée et assurant un rôle d'oxydant)
- le filtrat obtenu dans l'expérience n° 1
- une lampe
- une pipette graduée
- une propipette
- un bioréacteur à **ExAO** (**Exp**érimentation **A**ssistée par **O**rdinateur)
- un ordinateur
- une sonde oxymétrique (pour mesurer la concentration de dioxygène (O_2) dans la cuve du bioréacteur)
- le logiciel PASCO Capstone (afin de mesurer en temps réel la concentration de dioxygène dans la cuve du bioréacteur et d'obtenir un graphique présentant l'évolution de la concentration de dioxygène (en mg/L) en fonction du temps (en minutes) ; ce logiciel fait également office de chronomètre)
- une interface USB link (qui permet de transformer les signaux de la sonde oxymétrique en signaux numériques afin de lire les mesures de la concentration de dioxygène dans la cuve du bioréacteur, effectuées par la sonde oxymétrique, sur le logiciel PASCO Capstone)

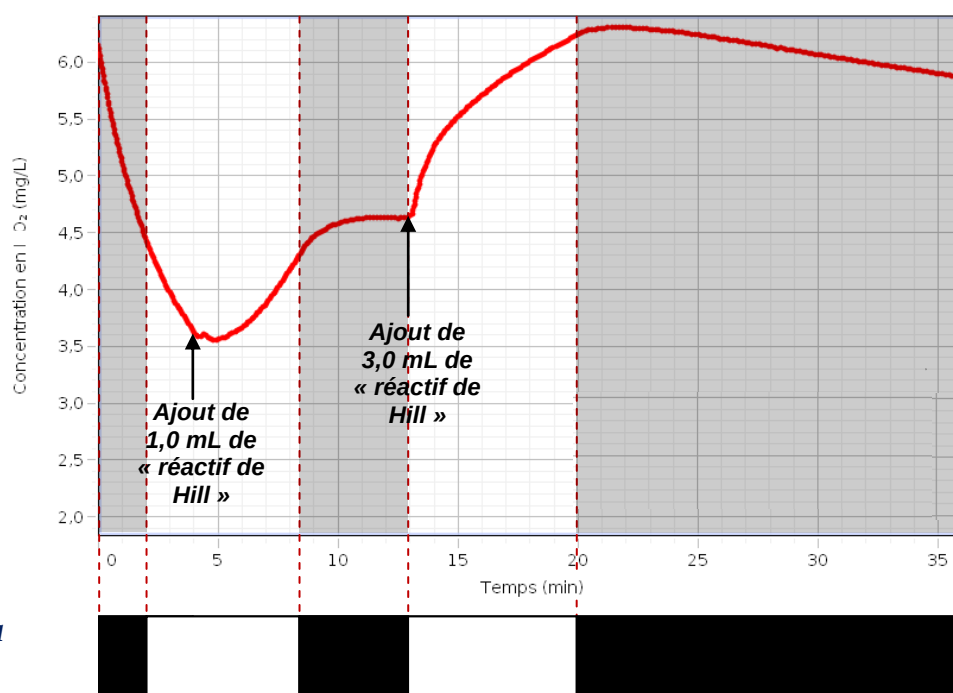
○ PROTOCOLE :

- verser de la solution d'hexacyanoferrate de potassium (très concentrée) dans le bécher
- placer le turbulent dans la partie centrale de la cuve du bioréacteur
- placer la cuve sur l'agitateur magnétique
- remplir la cuve extérieure de l'enceinte avec de l'eau froide
- placer un agitateur dans la cuve
- verser environ 20 mL de filtrat obtenu dans l'expérience précédente dans la cuve intérieure du bioréacteur

- fermer le bioréacteur avec le couvercle
- placer la sonde oxymétrique dans l'orifice prévu (sur le couvercle de la cuve du bioréacteur) et la faire tremper dans la cuve en veillant à ce qu'elle ne touche ni le fond de la cuve interne ni l'agitateur
- brancher l'interface sur l'ordinateur
- disposer la source de lumière éteinte dans la fente prévue à cet effet
- fermer la partie vitrée à l'aide du cache métallique afin de faire en sorte qu'il n'y ait pas de lumière dans la cuve
- fermer les autres trous du couvercle avec les bouchons
- lancer l'agitation de la cuve et la régler de sorte à ce qu'elle ne fasse pas de bruit
- sur l'ordinateur, ouvrir le logiciel PASCO Capstone et démarrer l'enregistrement de la concentration de dioxygène (en mg/L) de la cuve en fonction du temps (en minutes) pendant 2 minutes
- enlever le cache métallique de la cuve afin de permettre à la lumière de passer dans la cuve pendant 2 minutes
- prélever, à l'aide d'une seringue en plastique de 1 mL, 1 mL de solution d'hexacyanoferrate de potassium
- ajouter ce millilitre de solution d'hexacyanoferrate de potassium dans la cuve
- laisser réagir environ 4 minutes
- fermer la partie vitrée à l'aide du cache métallique afin de faire en sorte qu'il n'y ait pas de lumière dans la cuve puis attendre environ 4 minutes
- prélever, à l'aide de la même seringue en plastique, 3 mL de solution d'hexacyanoferrate de potassium (en trois fois)
- ajouter les 3 mL de solution d'hexacyanoferrate de potassium dans la cuve
- laisser réagir environ 7 minutes
- fermer la partie vitrée à l'aide du cache métallique afin de faire en sorte qu'il n'y ait pas de lumière dans la cuve puis attendre environ 15 minutes
- arrêter l'enregistrement (on obtient alors un graphique présentant l'évolution de la concentration de dioxygène (O_2) produit (en mg/L) en fonction du temps (en minutes) et des conditions lumineuses)

○ **RÉSULTATS OBTENUS :**

Graphique présentant l'évolution de la concentration de dioxygène dans la cuve du bioréacteur en fonction du temps et des conditions lumineuses

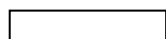


(cf. légende à la page suivante)

Légende :



Cuve du bioréacteur placée à l'obscurité



Cuve du bioréacteur éclairée en lumière blanche

○ **INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS OBTENUS :**

On peut remarquer que la concentration de dioxygène dans la cuve du bioréacteur varie au cours du temps.

En effet, on voit que, du début de l'expérience ($t = 0$ min) jusqu'à $t = 2$ min, cette concentration de dioxygène diminue fortement en passant de 6,20 mg/L à 4,40 mg/L quand on place la cuve dans un milieu obscur.

On voit ensuite que de $t = 2$ min à $t = 4$ min, une fois la cuve exposée à la lumière blanche, la concentration de dioxygène continue de diminuer en passant de 4,40 mg/L à 3,60 mg/L.

Toujours exposée à la lumière blanche, on ajoute 1,0 mL d'hexacyanoferrate de potassium (le « Réactif de Hill ») dans la cuve et on constate une forte augmentation de la concentration de dioxygène en passant de 3,60 mg/L (à $t = 4$ min) à 4,30 mg/L (à $t = 8$ min 30 s).

A $t = 8$ min 30 s, on place la cuve du bioréacteur dans un milieu obscur. On voit alors que la concentration de dioxygène se stabilise très rapidement car on passe de 4,30 mg/L (à $t = 8$ min 30 s) à 4,60 mg/L (à $t = 10$ min), valeur qui s'étend de $t = 10$ min à $t = 13$ min.

Lorsque $t = 13$ min, on place la cuve à la lumière blanche et on ajoute simultanément 3,0 mL de « Réactif de Hill ». On voit alors que la concentration de dioxygène augmente fortement en passant de 4,60 mg/L (à $t = 13$ min) à 6,25 mg/L (à $t = 20$ min).

A $t = 20$ min, on place la cuve dans un milieu obscur. On remarque que la concentration de dioxygène augmente légèrement avant de se stabiliser en passant de 6,25 mg/L (à $t = 20$ min) à 6,30 mg/L ($t \approx 20$ min 20 s), valeur qui s'étend de $t \approx 20$ min 20 s jusqu'à $t = 25$ min malgré le fait qu'il semble que le « Réactif de Hill » continue de réagir avec le filtrat contenu dans la cuve du bioréacteur. Puis cette concentration de dioxygène diminue de $t = 24$ min à $t = 36$ min en passant de 6,2 mg/L à 5,8 mg/L.

Or on sait que la photosynthèse se déroule en présence de chlorophylle, de dioxyde de carbone et d'eau.

On peut donc en déduire que les conditions nécessaires à la photosynthèse sont nombreuses. Tout d'abord, il faut, comme nous l'avons dit, la présence de dioxyde de carbone, de chlorophylle et d'eau, mais il faut aussi la présence d'une substance oxydante comme le « Réactif de Hill » (ici l'hexacyanoferrate de potassium) (comme on peut le voir de $t = 4$ min à $t = 8$ min 30 s mais aussi de $t = 13$ min à $t = 20$ min) et de lumière (comme on peut le voir de $t = 20$ min à $t = 24$ min). Ce processus de photosynthèse produit ainsi du dioxygène.

• **EXPÉRIENCE N° 3 : TEST À L'EAU IODÉE**

○ **MATÉRIEL :**

- un bécher numéroté « n°1 »
- de l'eau iodée (contenant de l'iodure de potassium)
- le bécher contenant le filtrat issu de l'expérience n° 1

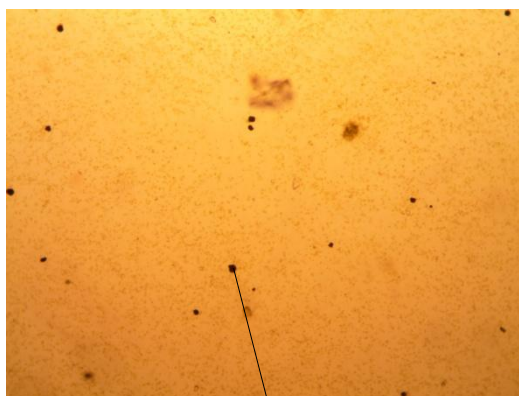
- une pipette plastique jetable
- une lame et une lamelle de microscope optique
- un microscope optique binoculaire
- une caméra digitale (afin de prendre des photographies des chloroplastes observés au microscope optique)
- un ordinateur
- le logiciel ToupView (afin de voir les images prises par la caméra et les enregistrer)

○ **PROTOCOLE :**

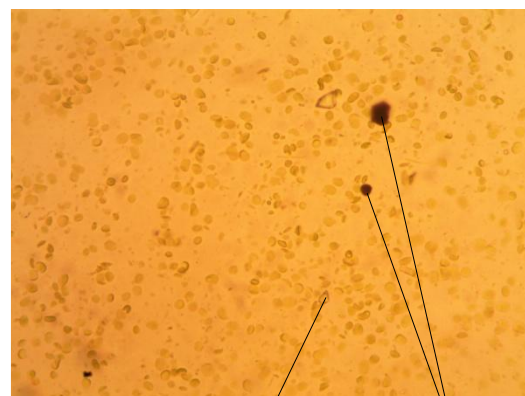
- exposer le filtrat à la lumière blanche
- verser de l'eau iodée dans le bécher n° 1
- prélever, à l'aide d'une seringue en plastique de 1 mL, un peu de filtrat issu de l'expérience n° 1 contenu dans le bécher
- verser, à l'aide d'une seringue en plastique de 1 mL, une goutte de filtrat sur une lamelle de microscope optique
- prélever de l'eau iodée contenue dans le bécher n° 1 à l'aide d'une pipette plastique jetable
- verser une goutte d'eau iodée sur la goutte de filtrat située sur la lame de microscope optique
- monter entre lame et lamelle
- agiter horizontalement la lame de microscope optique afin de mélanger l'eau iodée et le filtrat issu de l'expérience n° 1
- laisser réagir quelques secondes
- observer au microscope optique binoculaire s'il y a eu coloration des chloroplastes en violet ou en bleu afin de mettre en évidence la présence d'amidon (matière organique)
- retirer l'oculaire du microscope optique et y introduire la caméra digitale
- brancher la caméra digitale à l'ordinateur
- ouvrir le logiciel ToupView et prendre des photographies via le logiciel

○ **RÉSULTATS OBTENUS :**

Deux photographies présentant les chloroplastes issus du filtrat et observés au microscope optique binoculaire (grossissement $\times 100$ pour la première photographie, et grossissement $\times 400$ pour la seconde)



un chloroplaste coloré en violet



un chloroplaste

deux chloroplastes colorés en violet

○ INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS OBTENUS :

On peut observer la coloration de certains chloroplastes en violet après l'ajout d'eau iodée sur le filtrat.

Or on sait que l'eau iodée, en réagissant avec de l'amidon, se colore en violet. Sinon, elle reste marron.

On peut donc déduire que certains chloroplastes qui ont changé de couleur (ils sont passés du vert (comme on a pu le voir dans la première expérience (cf. « **RÉSULTATS OBTENUS** » de la première expérience p.11) au violet) témoignent d'une production d'amidon (polymère du glucose) (donc de matière organique) dans le stroma.

• CONCLUSION :

On peut conclure que la photosynthèse est un processus qui aboutit à la production de dioxygène (O₂) mais aussi de matière organique, ici des glucides (notamment l'amidon) grâce à la réduction du dioxyde de carbone (CO₂) de l'air. Cependant, ce processus ne se déroule que dans des conditions précises. En effet, il faut d'abord la présence de cellules eucaryotes végétales chlorophylliennes (contenant des chloroplastes et des molécules de chlorophylle dont nous aborderons l'utilité plus tard), de la lumière (les chloroplastes doivent être en contact direct avec l'énergie lumineuse), du dioxyde de carbone, de l'eau et d'un composé qui va l'oxyder : le « Réactif de Hill » (ici l'hexacyanoferrate de potassium). Notre hypothèse est donc validée.

Grâce à son expérience, Robert Hill a ainsi pu déterminer les différentes demi-équations de réduction d'un composé « R » et d'oxydation de l'eau ainsi que l'équation-bilan de la phase photochimique de la photosynthèse. On obtient donc :

La demi-équation d'oxydation de l'eau (H₂O):



(Cette oxydation se déroule dans les deux sens mais dans le cas de la photosynthèse, nous ne nous intéresserons qu'à ce sens-là)

La demi-équation de réduction d'un composé « R » :



(Cette réduction se déroule dans les deux sens mais dans le cas de la photosynthèse, nous ne nous intéresserons qu'à ce sens-là)

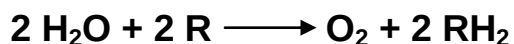
On peut constater que deux molécules d'eau (H₂O) se transforment en une molécule de dioxygène après avoir cédé deux électrons. Ayant cédé des électrons, les molécules d'eau sont les réducteurs et elles subissent ainsi une oxydation.

Le composé « R » prend possession de deux électrons cédés pour se transformer en un composé hydrogéné (RH₂). Ayant capté des électrons et ayant subi une hydrogénation, le composé « R » est l'oxydant et il subit ainsi une réduction.

Cependant, afin de réaliser le bilan de la réaction d'oxydoréduction de l'eau et d'un composé « R », il faut pondérer les deux demi-équations que nous venons de réaliser afin de faire disparaître les électrons dans l'équation-bilan. Pour cela, on multiplie par deux la demi-équation de réduction d'un composé « R » afin d'obtenir quatre électrons, proportion retrouvée dans la demi-équation d'oxydation de l'eau. On obtient donc :



L'équation-bilan de la réaction d'oxydoréduction de l'eau et des deux composés « R » est donc :



On peut remarquer que le dioxygène (O₂) est un produit de la phase photochimique de la photosynthèse qui est issu des molécules d'eau. Ce produit est considéré comme un déchet car il sera relâché dans l'atmosphère. Cela confirme ainsi les résultats que nous avons obtenus dans l'expérience de Hill dans laquelle on observait une production de dioxygène dans la cuve du bioréacteur.

Grâce aux expériences réalisées par **Arnon** en 1958, on sait désormais que la phase photochimique de la photosynthèse a lieu dans les thylakoïdes. En effet, il a réalisé trois expériences différentes afin de voir si le ¹⁴CO₂ (constitué d'un isotope radioactif du ¹²C qui permet ainsi d'être facilement suivi) s'était fixé sur des molécules organiques dans le stroma. Pour cela, il a placé uniquement du stroma à l'obscurité dans un milieu riche en ¹⁴CO₂ (première expérience). Parallèlement, il a placé un autre stroma à l'obscurité dans un milieu riche en ¹⁴CO₂ mais cette fois, ce stroma contient des thylakoïdes qui avaient été exposés préalablement à la lumière (deuxième expérience). Enfin, dans la troisième expérience, il a placé un autre stroma à l'obscurité, dans un milieu riche en ¹⁴CO₂ et mis en contact avec des composés réduits RH₂ et de l'Adénosine **Triphosphate (ATP)**, une molécule organique (constituée d'une base azotée en adénine et d'un sucre (le ribose), auxquels sont liés trois groupes de phosphates organiques) qui, lors de l'hydrolyse des liaisons phosphates, libère l'énergie nécessaire aux différentes activités cellulaires, chez les cellules eucaryotes comme procaryotes (c'est une molécule dite universelle). Nous détaillerons l'utilité de l'ATP dans le **C**. Arnon a ainsi obtenu, dans la première expérience, une absence de fixation du ¹⁴CO₂ sur une molécule organique alors que dans les deux autres expériences, il y a eu fixation de cette molécule radioactive, ce qui lui a permis de conclure que la phase photochimique de la photosynthèse a lieu dans les thylakoïdes qui, sous l'effet de la lumière, vont produire des composés réduits RH₂ grâce à l'eau (démontré précédemment par l'expérience de Hill) mais aussi de l'ATP.

Cependant, l'oxydoréduction de l'eau et des deux composés « R » se déroule sur plusieurs étapes qui nécessitent la présence d'éléments capables de transformer l'énergie lumineuse en énergie chimique. L'un de ces éléments est notamment la molécule de chlorophylle contenue dans la membrane des thylakoïdes. Cette molécule de chlorophylle brute est composée de deux pigments verts, les **chlorophylles a et b** (ainsi que d'autres pigments, notamment des pigments jaunes et orangés : les caroténoïdes). Etant de couleur verte, la molécule de chlorophylle absorbe toutes les radiations du spectre de la lumière blanche à l'exception de la lumière verte qui va donc être diffusée (comme on peut le voir sur le spectre d'absorption de la solution de chlorophylle brute p. 17). L'absorption de toutes ces radiations permet ainsi aux divers électrons qui transitent par la **chlorophylle a** et qui sont échangés lors de l'oxydoréduction de l'eau et du composé « R » de gagner en niveau d'énergie et donc de permettre la continuité des autres étapes d'oxydoréduction grâce à la **chaîne photosynthétique** (cette chaîne représente une série d'enzymes qui vont assurer le transport, le transfert d'électrons ainsi que l'extraction de protons). Seule la chlorophylle a permet le fonctionnement de ce processus. Elle peut, dans le cas où elle ne permettrait pas un gain d'énergie pour les électrons, restituer la lumière absorbée en **lumière verte fluorescente** : elle a donc la capacité de diffuser, en plus de la lumière verte, une autre lumière issue de la transformation des rayonnements Ultra Violets (UV). Par ailleurs, les autres colorants servent à élargir le spectre d'absorption de la lumière blanche.

Deux spectres : celui du haut étant le spectre continu de la lumière blanche et celui d'en-dessous le spectre d'absorption d'une solution de chlorophylle brute

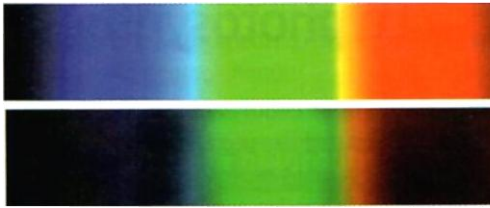
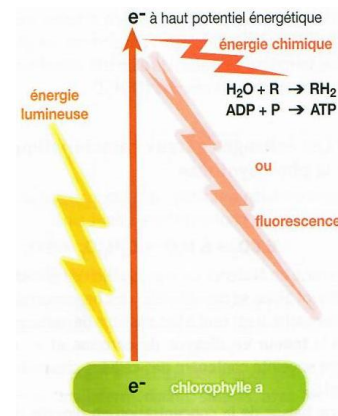


Schéma présentant le rôle de la chlorophylle a en présence de lumière



SOURCES DES 2 DOCUMENTS : Manuel SVT T^{erm} S enseignement de spécialité SVT programme 2012, Bordas, 2012, ISBN : 978-2-04-732930-6, p. 23

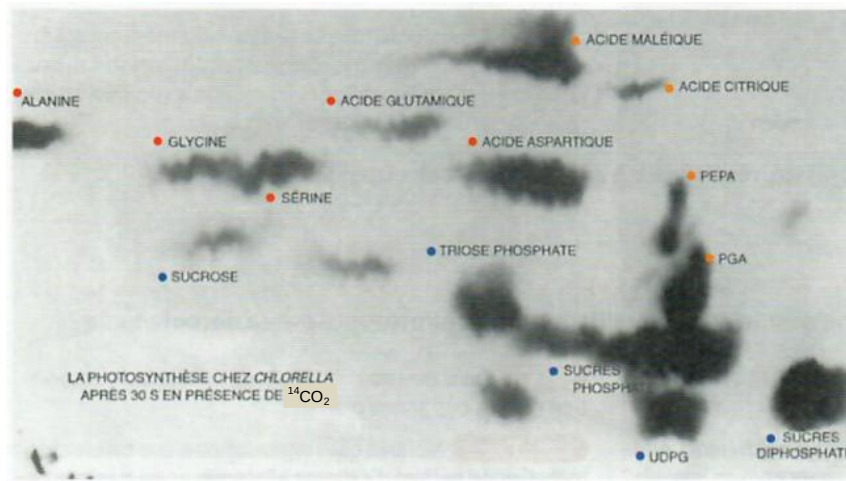
2.3. La phase chimique de la photosynthèse

La phase chimique consiste à réduire le dioxyde de carbone de l'air en matière organique. En effet, cela a été confirmé par une expérience réalisée par trois scientifiques (Calvin, Benson et Bassham) dans les années 1950 : lorsqu'on place des **chlorelles** (algues unicellulaires donc constituées d'une seule cellule eucaryote végétale chlorophyllienne (donc constituée de chloroplastes)) dans un récipient plat, transparent, placé entre deux éclairages puissants, et très riche en $^{14}\text{CO}_2$ (afin de suivre le trajet de cet isotope une fois la photosynthèse terminée), on prélève, au bout de 30 secondes, un échantillon de la culture afin de la mettre en contact avec de l'alcool bouillant pour mettre fin directement aux différentes réactions qui ont lieu au cours de la photosynthèse. On réalise ensuite une **chromatographie** de cet échantillon (afin de séparer et donc d'identifier les différents éléments chimiques produits après la photosynthèse) suivie d'un **chromatogramme** sur un **papier photographique** (sur lequel on étale, à l'aide d'un solvant, les constituants du mélange) ainsi que d'une **autoradiographie** (technique qui consiste à localiser des atomes radioactifs absorbés préalablement par des molécules sur un papier photographique). On peut ainsi révéler toutes les molécules contenant du ^{14}C (issues du $^{14}\text{CO}_2$) qui sont des glucides, des acides aminés et des acides organiques : il y a bien production de matière organique à l'issue de la photosynthèse (l'expérience que nous avons réalisée précédemment avait aussi révélé la production d'amidon qui est un glucide).

Photographie présentant le dispositif utilisé pour l'expérience réalisée par Calvin, Benson et Bassham



**Résultats obtenus après la réalisation de l'expérience réalisée par
Calvin, Benson et Bassham**



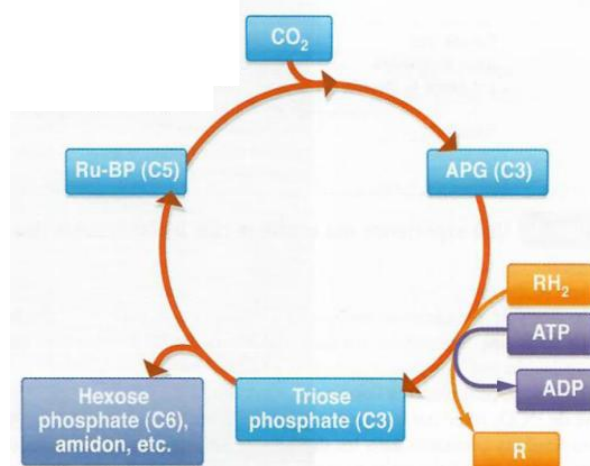
Légende :

- glucides (●) ;
- acides aminés (●) ;
- acides organiques (●).

*SOURCES DES DEUX DOCUMENTS : Manuel SVT T^{erm} S enseignement de spécialité
SVT programme 2012. Bordas, 2012, ISBN : 978-2-04-732930-6, p. 18*

L'ensemble des molécules produites et transformées lors de la photosynthèse est établi, grâce aux trois collaborateurs Calvin, Bassham et Benson, selon un cycle appelé « Cycle de Calvin » : dans le stroma des chloroplastes, on trouve des molécules de Ribulose biphosphate (**Ru-BP**), constituées de 5 atomes de carbone, qui vont jouer le rôle d'accepteurs organiques de la molécule de CO₂ de l'air qui va s'y fixer et provoquer la dissociation de la nouvelle molécule formée en deux molécules d'Acide phosphoglycérique (**APG**) chacune constituée de 3 atomes de carbone. Ces APG sont ensuite réduits en 2 Triose phosphate, deux sucres à trois carbones chacun, mais cette réduction nécessite l'apport d'ATP et de deux molécules d'hydrogène qui étaient préalablement produits par la phase photochimique et transportés par les composés réduits RH₂ : la phase chimique est donc dépendante de la phase photochimique. Ainsi, les deux APG vont réagir avec l'ATP (il va libérer un **ADP** (**A**dénosine **D**iphosphate) en ayant prélevé un groupe phosphate) et les composés réduits RH₂ (il va libérer deux composés « R » en ayant prélevé les quatre atomes d'hydrogène) pour former deux Triose phosphate qui vont réagir soit entre eux pour donner un Hexose phosphate (comme le glucose), soit avec des métabolites comme le Glucose-1-Phosphate (G1P) ou le Glucose-6-Phosphate (G6P), pour produire de l'**amidon**, mais il existe de nombreuses autres réactions possibles. De ce fait, les Triose phosphate seront transformés à la fois en matière organique (glucide, acide aminé ou acide organique) mais aussi en Ru-BP afin de renouveler ce cycle de Calvin. Toutes ces étapes que nous venons de citer sont toutefois les principales étapes du Cycle de Calvin.

Schéma présentant les principales étapes constituant le Cycle de Calvin



*SOURCES : Manuel SVT T^{erm} S
enseignement de spécialité SVT
programme 2012. Bordas, 2012,
ISBN : 978-2-04-732930-6, p. 19*

La matière organique produite à l'issue de la photosynthèse des végétaux chlorophylliens servira à leur croissance : ils se nourrissent ainsi de matière minérale (CO_2 et H_2O) pour produire leur propre matière organique et c'est pour cela qu'ils sont qualifiés d'organismes **autotrophes**.

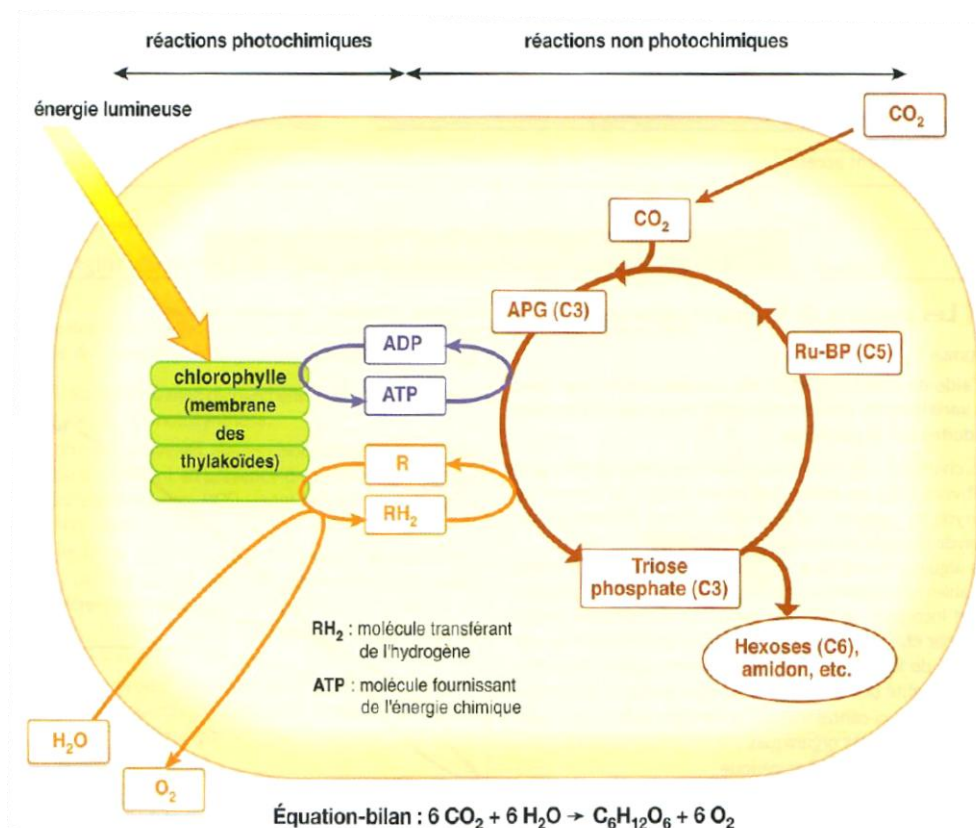
3. Bilan

Le chloroplaste est un organe présent uniquement dans les cellules eucaryotes végétales chlorophylliennes. C'est dans cet organe qu'a lieu le processus de photosynthèse qui se déroule en deux étapes (la phase photochimique qui précède la phase chimique) et qui sert à la fois pour la production d'énergie, avec la synthèse de l'ATP, et pour la production de matière organique consommable par l'ensemble de la cellule et donc nécessaire à la croissance de la plante. La production de matière organique se fait de manière indépendante chez les végétaux chlorophylliens du fait qu'ils n'ont pas besoin de consommer de matière organique externe (contrairement aux organismes hétérotrophes comme l'Homme).

L'équation-bilan (simplifiée) de la photosynthèse (concernant la production de glucose ($\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$)) est donc la suivante :



Schéma-bilan de la photosynthèse



SOURCES : Manuel SVT T^{erm} S enseignement de spécialité SVT programme 2012.
Bordas, 2012, ISBN : 978-2-04-732930-6, p. 27

C. LA MITOCHONDRIE

La mitochondrie, tout comme le chloroplaste, est un organite. Elle est présente par dizaine ou centaine dans le cytoplasme et est caractéristique de la cellule eucaryote (animale et végétale chlorophyllienne ou non) sauf dans de rares exceptions comme les hématies. La quantité de mitochondries est très importante du fait qu'une cellule a un besoin considérable d'énergie pour son métabolisme.

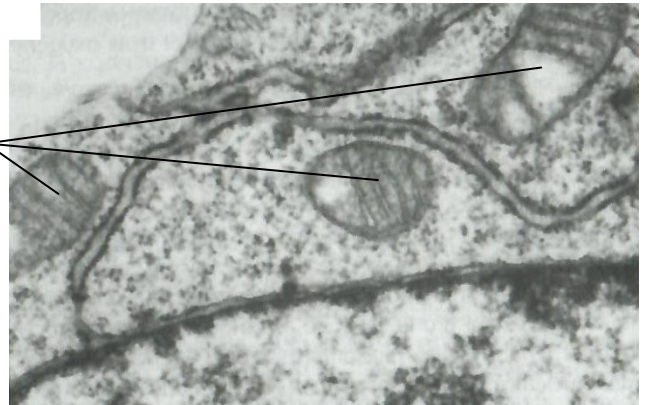
Photographie d'une mitochondrie au microscope électronique à balayage (MEB)



SOURCES : Manuel SVT T^{erm} S enseignement de spécialité SVT programme 2012. Bordas, 2012, ISBN : 978-2-04-732930-6, p. 39

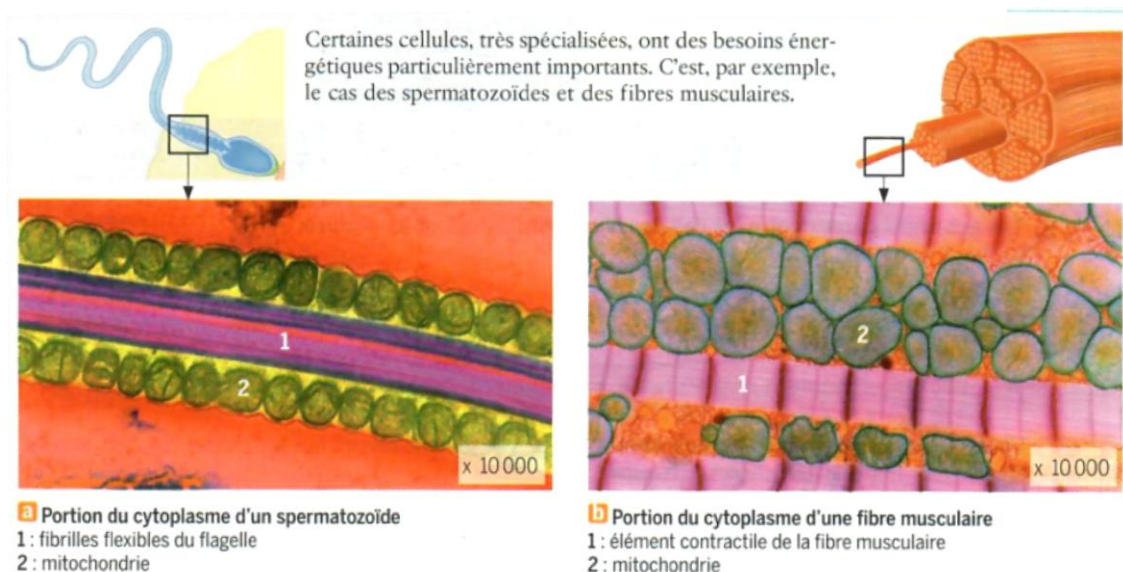
Micrographie d'une coupe mince de cellule eucaryote prise à l'aide d'un microscope électronique

Mitochondries



SOURCES : Rensberger, Boyce. Au cœur de la vie, au royaume de la cellule vivante. De Boeck Université, 1999, ISBN-10 : 2744500542, ISBN-13 : 978-274450054, p. 96

Schémas présentant l'importance des mitochondries chez les spermatozoïdes et les muscles

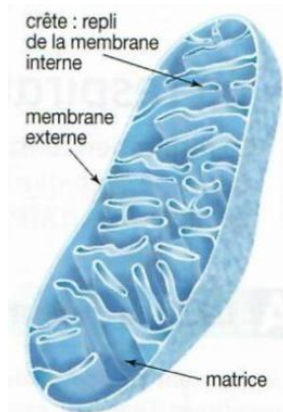


SOURCES : Manuel SVT T^{erm} S enseignement de spécialité SVT programme 2012. Bordas, 2012, ISBN : 978-2-04-732930-6, p. 36

1. Structure interne

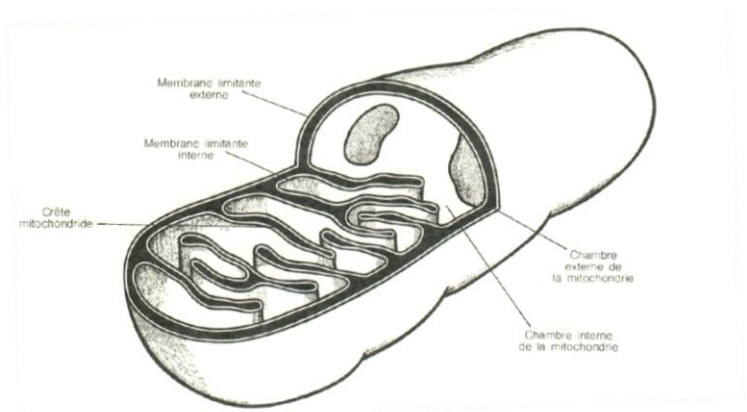
Tout comme le chloroplaste, la mitochondrie a une structure interne bien définie. En effet, cet organelle ellipsoïdal, dont la taille varie de 1 à 2 μm de longueur, est délimité par une double membrane plasmique : la **membrane limitante externe** et la **membrane limitante interne**. La partie interne de la mitochondrie est ainsi divisée en deux chambres : une **chambre externe**, située entre les deux membranes (espace appelé **espace inter-membranaire**), et une **chambre interne**, limitée par la membrane limitante interne (partie centrale de la mitochondrie). Cette membrane limitante interne forme de nombreux replis appelés **crêtes mitochondriales** dont la surface (côté interne) est riche en protéines qui représentent 80% de ses constituants. La chambre interne de la mitochondrie est constituée d'un liquide, un gel hydraté, contenant de nombreux éléments (notamment des substances dissoutes) appelé **matrice mitochondriale**. La structure en crêtes mitochondriales permet l'augmentation de la surface de contact entre ces dernières et la matrice.

Schéma présentant la structure interne d'une mitochondrie



*SOURCES : Manuel SVT T^{erm} S
enseignement de spécialité SVT programme
2012, Bordas, 2012, ISBN : 978-2-04-
732930-6, p. 39*

Schéma présentant la structure interne d'une mitochondrie



*SOURCES : Lacombe, Michel. Précis d'anatomie et de physiologie humaines,
atlas 26^e édition, préparation au Diplôme d'Etat d'Infirmières et aux
professions paramédicales. Lamarre, 1989, ISBN : 2-85030-048-9, p. 8*

2. La respiration cellulaire

Comme tout être vivant, la cellule respire afin de produire de l'énergie grâce au dioxygène et va libérer du dioxyde de carbone et de l'eau sous forme de vapeur.

La **respiration cellulaire** est un processus d'oxydation de métabolites organiques comme les lipides, les protéines et les glucides destiné à produire l'énergie nécessaire aux activités cellulaires sous forme d'ATP. Ce processus se déroule en trois étapes, chacune dans un endroit différent de la cellule eucaryote : la première étape est la **glycolyse** et se déroule dans le hyaloplasme. La seconde est une succession de réactions chimiques constituant le **cycle de Krebs** et se situe dans la matrice mitochondriale. La troisième et dernière étape est l'**oxydation des composés réduits issus des étapes précédentes de la respiration cellulaire** au niveau des crêtes mitochondriales. Ces trois étapes représentent chacune une réaction biochimique principale.

Dans cette partie, nous ne nous intéresserons qu'aux cellules eucaryotes animales aérobies (c'est-à-dire des cellules eucaryotes animales qui prélèvent le dioxygène nécessaire à la respiration dans le milieu extracellulaire) **et au cas du devenir du glucose dans ce type de cellules.**

2.1. Définitions

Un **cofacteur** est une molécule non protéique nécessaire au fonctionnement d'une protéine comme une **enzyme***.

*Une **enzyme** (ou un enzyme) est une molécule biologique qui catalyse (c'est-à-dire qui accélère) certaines réactions chimiques.

Un **coenzyme** est une molécule organique de petite taille, non protéique, qui assure le rôle de cofacteur d'une enzyme en agissant en tant que transporteur d'électrons ou d'atomes et reste inchangé au cours des réactions qu'elle accélère.

La **décarboxylation** est une réaction chimique irréversible au cours de laquelle une molécule perd une molécule de CO_2 .

L'**hydratation** est une réaction chimique au cours de laquelle une molécule prend possession d'une molécule d'eau. A l'inverse, la **déshydratation** entraîne la perte d'une molécule d'eau.

Des molécules sont dites **isomères** lorsqu'elles possèdent la même formule brute (les mêmes atomes dans les mêmes proportions) mais une répartition spatiale des atomes différente.

Une **formule développée** est une représentation moléculaire qui montre tous les atomes et toutes les liaisons (sauf les doublets non liants entre deux électrons libres).

2.2. La glycolyse dans le hyaloplasme

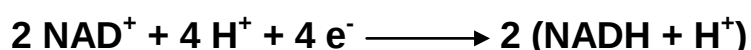
Certaines études expérimentales ont permis de montrer que les mitochondries ne consomment pas le glucose de manière directe. En effet, il y a au préalable une étape (la première) qui se déroule dans le hyaloplasme de la cellule. Dans cette partie, une molécule de glucose ($\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$) est progressivement oxydée en deux molécules d'**acide pyruvique** ($2 \text{ C}_3\text{H}_4\text{O}_3$) : deux atomes d'hydrogène issus du glucose vont alors être pris en charge par un coenzyme, la **Nicotinamide Adénine Dinucléotide (NAD)**, lui-même déjà oxydé et noté NAD^+ (au nombre de deux). Ces deux coenzymes sont hydrogénés et sont donc réduits en **2 (NADH + H^+)**. La succession des réactions d'oxydoréduction des coenzymes NAD^+ et de la molécule de glucose se nomme la **glycolyse**. La réaction d'oxydoréduction produit de l'énergie permettant la synthèse de deux molécules d'ATP par molécule de glucose oxydée. En effet, la synthèse d'ATP nécessite de l'ADP, un ion phosphate inorganique (noté **Pi**) et de l'énergie. Ici, afin de produire deux molécules d'ATP, il faut donc 2 ADP et 2 Pi. On peut ainsi écrire les différentes demi-équations d'oxydoréduction d'une molécule de glucose et de 2 NAD^+ qui interviennent lors de la glycolyse :

La demi-équation d'oxydation du glucose ($\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$):



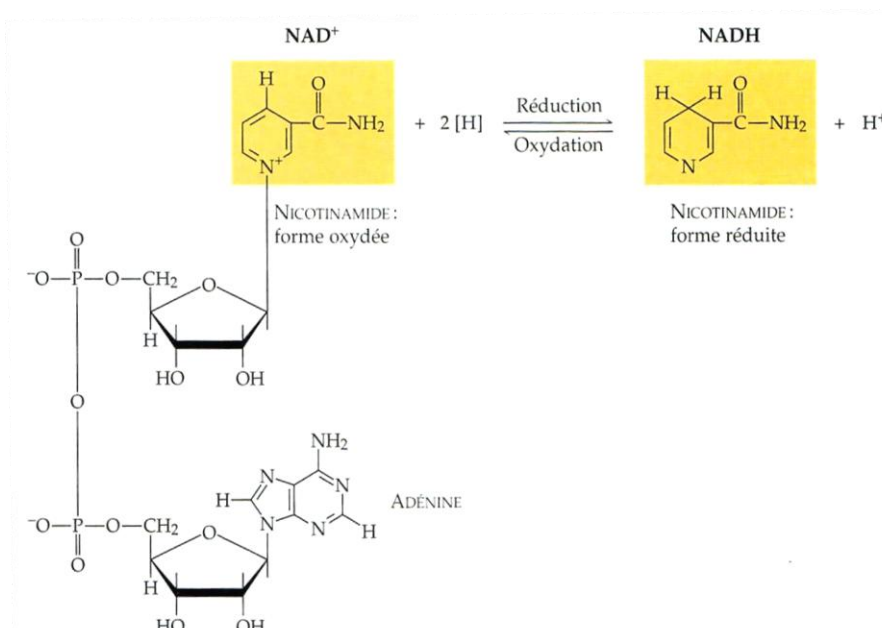
(Cette oxydation se déroule dans les deux sens mais dans le cas de la respiration cellulaire, nous ne nous intéresserons qu'à ce sens-là)

La demi-équation de réduction des deux coenzymes NAD^+ :



(Cette réduction se déroule dans les deux sens mais dans le cas de la respiration cellulaire, nous ne nous intéresserons qu'à ce sens-là)

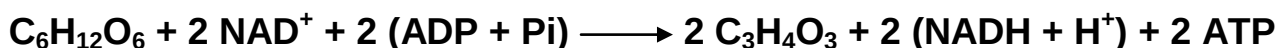
Représentations moléculaires de la coenzyme NAD réduite et oxydée



SOURCES : Campbell, N.A.. Biologie, adaptation et révision scientifique de Richard Mathieu. De Boeck Université, 1995, ISBN DE BOECK : 2-8041-2084-8, ISBN ERPI : 2-7613-0653-8, p. 177

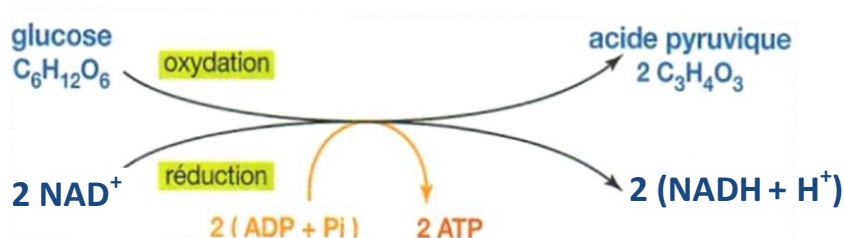
Nous pouvons maintenant réaliser le bilan de la réaction d'oxydoréduction du glucose et des coenzymes NAD^+ en pondérant les deux demi-équations que nous venons de réaliser (nous n'avons pas besoin de multiplier une des deux demi-équations afin de faire disparaître les électrons dans l'équation-bilan du fait qu'elles ont autant d'électrons).

L'équation-bilan de la réaction d'oxydoréduction du glucose et des deux coenzymes NAD^+ (donc la glycolyse) est :



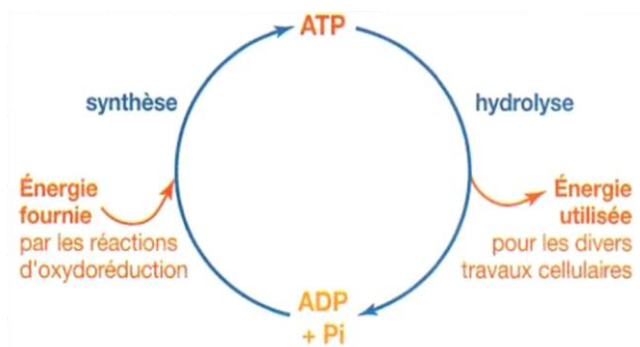
On peut remarquer que les deux molécules d'acide pyruvique, les 2 ($\text{NADH} + \text{H}^+$) et les 2 ATP sont bien les produits de la glycolyse dans le hyaloplasme.

Schéma synthétisant les principales réactions biochimiques qui interviennent lors de la glycolyse dans le hyaloplasme



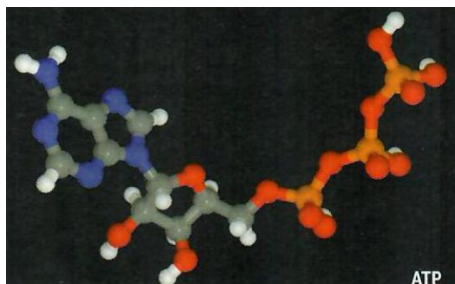
SOURCES : Manuel SVT T^{erm} S enseignement de spécialité SVT programme 2012. Bordas, 2012, ISBN : 978-2-04-732930-6, p. 38

Schéma présentant la synthèse et l'hydrolyse d'une molécule d'ATP

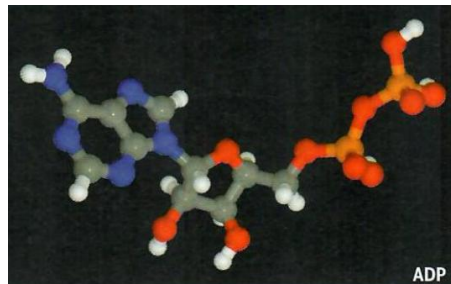


Ce schéma souligne bien le fait que les réactions d'oxydoréduction produisent de l'énergie qui permet de synthétiser une molécule d'ATP à partir de deux molécules d'ADP et d'un P_i . Il montre par ailleurs que l'hydrolyse des liaisons phosphates d'une molécule d'ATP produit également de l'énergie et libère ainsi une molécule d'ADP et un P_i .

Modèle moléculaire de l'ATP



Modèle moléculaire de l'ADP



SOURCES DES 3 DOCUMENTS : Manuel SVT T^{erm} S enseignement de spécialité SVT programme 2012. Bordas, 2012, ISBN : 978-2-04-732930-6, p. 40

2.3. Le cycle de Krebs dans la matrice mitochondriale

Les deux molécules d'acide pyruvique produits lors de la glycolyse vont traverser les deux membranes limitantes de la mitochondrie pour se retrouver dans la matrice mitochondriale. Une fois dans la matrice, ces deux molécules d'acide pyruvique vont être totalement dégradées au cours d'une succession de réactions biochimiques complexes qui constituent un cycle appelé « Cycle de Krebs ». Ce cycle est constitué de dix étapes avec une étape préalable*.

*voir les étapes du cycle de Krebs dans « **1. Les étapes du cycle de Krebs** » (p. 43 - 48) dans la partie « **F. ANNEXE** » p. 43.

Au cours de l'étape préalable, les deux molécules d'acide pyruvique vont être oxydées (par deux coenzymes NAD^+) en deux molécules d'acide citrique avant de se fixer sur leur accepteur organique qui est l'acide oxaloacétique (on obtient alors **2 ($NADH + H^+$)**). Cette fixation de l'acide citrique sur l'acide oxaloacétique constitue la première étape du Cycle de Krebs. La nouvelle molécule organique formée à l'issue de la première étape du cycle va subir plusieurs réactions biochimiques dont deux oxydations, dont la première a lieu au cours de l'étape 4 (cf. étape 4 p. 45) et la seconde au cours de l'étape 6 (cf. étape 6 p. 45). Ces deux oxydations font intervenir chacune deux coenzymes NAD^+ . On obtient alors, au total, **4 ($NADH + H^+$)**. La nouvelle molécule organique intermédiaire (le succinyl-CoA) formée à l'issue de l'étape 6 (cf. étape 6 p. 45) va, au cours de l'étape suivante (cf. étape 7 p. 46), être scindée en deux molécules d'acide succinique. Cette séparation va produire de l'énergie permettant la synthèse de deux molécules de **Guanosine Triphosphate (GTP)** (uniquement chez les animaux car chez les végétaux, il y a production de 2 ATP). La GTP assure un rôle similaire par rapport à l'ATP du fait qu'elle donne ses groupes phosphates et son hydrolyse produit de l'énergie nécessaire à une activité cellulaire. Ces 2 GTP donnent chacune ensuite un groupe phosphate à un ADP pour former un ATP : il y a donc production de deux molécules d'ATP. Au cours de l'étape suivante (cf. étape 8 p. 46), les deux molécules d'acide succinique vont à leur tour subir une

oxydation par deux coenzymes appelés **ubiquinones** (notées **CoQ₁₀** ou **FAD**) pour former 2 CoQ₁₀ réduites et donc notées **2 CoQ₁₀H₂** et deux molécules d'**acide fumarique**. Ces deux molécules d'acide fumarique vont subir une autre réaction biochimique avant d'être oxydées au cours de la dernière étape du cycle de Cycle de Krebs par 2 NAD⁺ pour former deux molécules d'**acide oxaloacétique** et **2 (NADH + H⁺)**. On peut ainsi remarquer que l'accepteur organique de départ, l'acide oxaloacétique, est régénéré : le Cycle de Krebs est donc régénéré lui aussi.

Au total, au cours des dix étapes du Cycle de Krebs et de l'étape préalable, six molécules de CO₂ vont être libérées (cf. l'étape préalable p. 43 mais aussi les étapes 5 et 6 p. 45), deux molécules d'ATP sont produites et six molécules d'eau sont consommées (cf. l'étape préalable p. 43 mais aussi les étapes 7 et 9 p. 46) et ce, pour deux molécules d'acide pyruvique et donc une molécule de glucose (oxydée). Par ailleurs, 8 (NADH + H⁺) ainsi que 2 CoQ₁₀H₂ seront produites. A ces 8 (NADH + H⁺) s'ajoutent les 2 (NADH + H⁺) produits lors de la glycolyse dans le hyaloplasme : on obtient donc un total de **10 (NADH + H⁺)** et de **2 CoQ₁₀H₂** et donc de **12 coenzymes réduits**.

L'ÉQUATION-BILAN (SIMPLIFIÉE) DU CYCLE DE KREBS EST DONC :

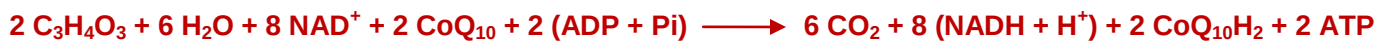
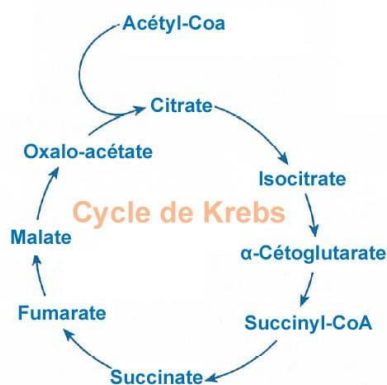
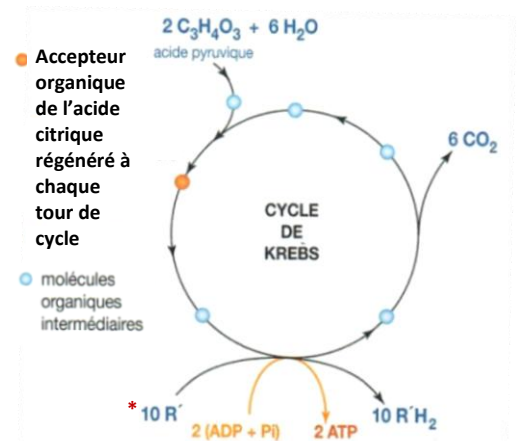


Schéma (simplifié) présentant les principales étapes qui constituent le Cycle de Krebs



SOURCES : Letanoux. Cycle de Krebs.
<http://www.cycledekrebs.fr/>

Schéma présentant les principaux réactifs et produits du Cycle de Krebs



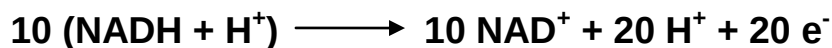
* Les 10 molécules « R'H₂ » représentent les 10 coenzymes réduits qui interviennent lors du Cycle de Krebs

SOURCES : Manuel SVT T^{erm} S enseignement de spécialité SVT programme 2012. Bordas, 2012, ISBN : 978-2-04-732930-6, p. 38

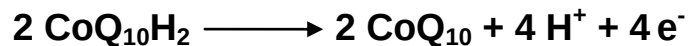
2.4. La chaîne respiratoire au niveau des crêtes mitochondriales

Cette troisième et dernière étape de la respiration cellulaire se déroule au niveau des crêtes mitochondriales : dans la membrane limitante interne de la mitochondrie, on trouve des protéines (qui représentent 80 % des constituants crêtes mitochondriales) sous forme d'un ensemble complexe de molécules constituant une chaîne appelée **chaîne respiratoire** qui la traverse : cette chaîne respiratoire est donc en contact à la fois avec la matrice, la membrane limitante interne et l'espace inter-membranaire. Sur ces molécules constituant la chaîne respiratoire, du côté de la matrice, vont se fixer les douze coenzymes réduits obtenus à l'issue de la glycolyse et du cycle de Krebs. Ces coenzymes vont par la suite être oxydés par les molécules de la chaîne respiratoire qui vont à leur tour assurer le rôle de transporteurs d'électrons. En effet, chaque transporteur d'électrons en accepte et en transmet au transporteur suivant à la suite d'une oxydation. Ces oxydations successives permettent de produire l'énergie nécessaire à la synthèse de 32 ATP à partir de 32 ADP et de 32 Pi grâce à des mécanismes complexes. Parallèlement, six molécules de dioxygène vont elles aussi se fixer sur la chaîne respiratoire et vont prendre possession des électrons transportés par cette dernière : douze molécules d'eau sont ainsi formées et libérées dans la membrane limitante interne. On obtient ainsi les demi-équations et le bilan d'oxydoréduction des six molécules de dioxygène et des douze coenzymes réduits ainsi que l'équation de la synthèse des 32 ATP :

- La demi-équation d'oxydation des 10 (NADH + H⁺) :



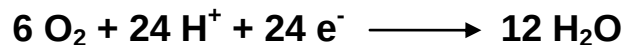
- La demi-équation d'oxydation des 2 CoQ₁₀H₂ :



- L'équation-bilan d'oxydation des douze coenzymes réduits :



- La demi-équation de réduction des 6 O₂ :



(Toutes ces demi-équations (ainsi que l'équation-bilan d'oxydation) fonctionnent dans les deux sens mais dans le cas de la respiration cellulaire, nous ne nous intéresserons qu'à ce sens-là)

L'équation-bilan d'oxydoréduction des 10 (NADH + H⁺), des 2 CoQ₁₀H₂ et des 6 O₂ de la chaîne respiratoire est donc :



Schéma présentant le fonctionnement (simplifié) de la chaîne respiratoire au niveau des crêtes mitochondriales

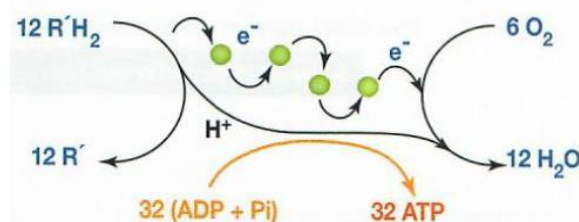
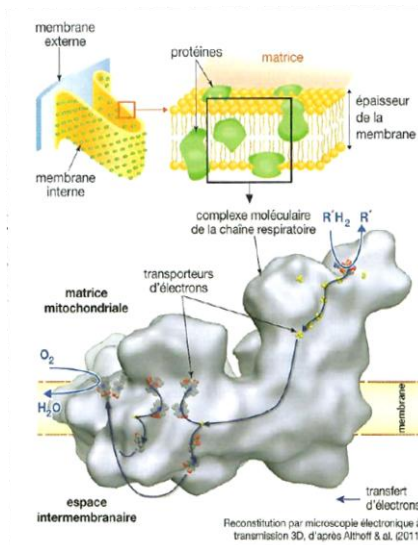
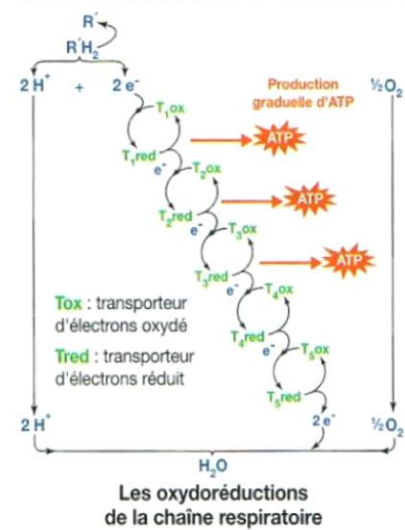


Schéma présentant la structure et le but de la chaîne respiratoire au niveau des crêtes mitochondriales



Les molécules « R' » sont les notations génériques représentant les coenzymes qui interviennent lors des étapes précédentes de la respiration cellulaire.

Schéma présentant le fonctionnement (simplifié) de la chaîne respiratoire au niveau des crêtes mitochondriales



Ce schéma fonctionne pour 1 molécule « R' » (un coenzyme). Sachant qu'il y en a normalement 12, il faut donc multiplier par 12 le nombre d'ions H^+ , d'électrons, de molécules de dioxygène et d'eau.

SOURCES DES 3 DOCUMENTS : Manuel SVT T^{erm} S enseignement de spécialité SVT programme 2012. Bordas, 2012, ISBN : 978-2-04-732930-6, p. 39

3. L'utilisation de l'ATP par la cellule

Dans les conditions de pH et de température dans les cellules, l'hydrolyse des liaisons phosphates de $n_{ATP} = 1,0 \text{ mol}$ produit 50 KJ. De ce fait, pour $n_{Glucose} = 1,000 \text{ mol}$ (correspond à environ 180,0 g de glucose), on a :

$$n_{Glucose} = \frac{N_{Glucose}}{N_A} \Leftrightarrow N_{Glucose} = n_{Glucose} \times N_A$$

(avec « n » représentant la quantité de matière (en mol), « N » le nombre d'une certaine entité chimique et « N_A » la constante d'Avogadro)

$$\Leftrightarrow N_{Glucose} = 1,000 \times 6,022 \times 10^{23} \Leftrightarrow N_{Glucose} = 6,022 \times 10^{23}$$

Sachant que pour une molécule de glucose on obtient 36 molécules d'ATP à l'issue de la respiration cellulaire, on a :

$$N_{ATP} = 36 \times N_{Glucose}$$

$$\Leftrightarrow N_{ATP} = 36 \times 6,022 \times 10^{23}$$

$$\Leftrightarrow N_{ATP} \approx 2,2 \times 10^{25}$$

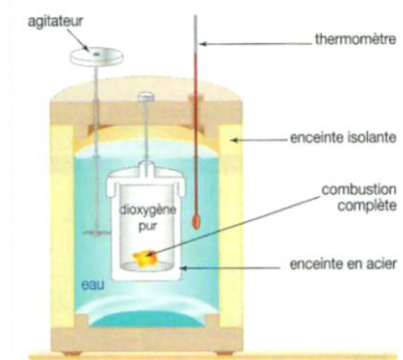
$$\Rightarrow n_{ATP} = \frac{N_{ATP}}{N_A} = \frac{2,2 \times 10^{25}}{6,022 \times 10^{23}} \approx 36 \text{ mol}$$

D'où la quantité d'énergie chimique (ΔE) produite lors de l'hydrolyse des liaisons phosphates de $n_{ATP} = 36 \text{ mol}$:

$$\Delta E_{n_{ATP}} = 36 \times 50 \quad \Leftrightarrow \quad \Delta E_{n_{ATP}} = 1,8 \times 10^6 \text{ J} = 1\,800 \text{ kJ}$$

Par ailleurs, on sait, grâce à un **calorimètre** (dispositif qui permet de mesurer la quantité de chaleur dégagée par la combustion complète d'une quantité de matière connue), que la combustion de $n_{Glucose} = 1 \text{ mol}$ produit 2 870 kJ. Donc la quantité d'énergie chimique produite par l'hydrolyse des liaisons phosphates de 36 mol d'ATP représente environ 60 % (car $\frac{1\,800}{2\,870} \times 100 \approx 60 \%$) du rendement énergétique de la respiration cellulaire, ce qui est considérable.

Schéma présentant un calorimètre



SOURCES : Manuel SVT T^{er}m S
enseignement de spécialité SVT programme
2012. Bordas, 2012, ISBN : 978-2-04-
732930-6, p. 41

Cette énergie chimique produite lors de l'hydrolyse des liaisons de molécules d'ATP est nécessaire à n'importe quelle activité cellulaire telle que la **cyclose** (mouvements intracytoplasmiques réalisés par les organites afin de parcourir la totalité du volume cytoplasmique), la **polymérisation de nucléotides en ARNm** par exemple (Acide Ribonucléique messenger, molécule proche de l'ADN du fait que l'ARNm est issu de la transcription d'un gène d'un seul brin de l'ADN. Cet ARNm sera ensuite traduit afin de synthétiser des protéines) ou en **ADN** comme lors la **réplication semi-conservative de l'ADN** (mécanisme qui permet, avant la division d'une cellule non reproductrice appelée mitose, de recopier une molécule d'ADN à l'identique), la **synthèse de protéines** (molécules constituées d'un assemblage d'acides aminés, comme les enzymes ou les hormones par exemple), mais aussi la **photosynthèse** (phase photochimique) comme nous l'avons vu précédemment. Il existe bien sûr de nombreuses autres activités cellulaires nécessitant de l'ATP.

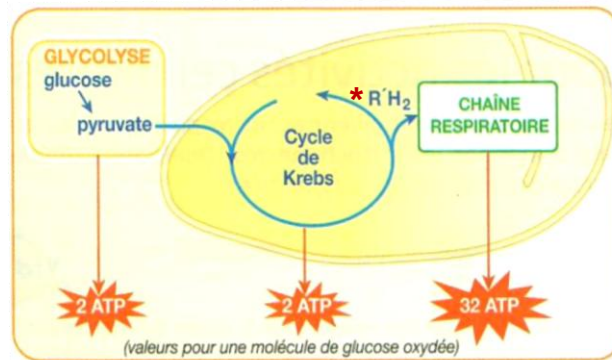
4. Bilan

La mitochondrie est un organe présent uniquement dans les cellules eucaryotes (animales et végétales chlorophylliennes ou non). C'est dans cet organe qu'ont lieu les deux dernières étapes de respiration cellulaire qui suivent la première (ayant lieu dans le cytoplasme de la cellule). Ce processus se déroule donc en trois étapes (la glycolyse, le cycle de Krebs et l'oxydation des composés réduits) et sert à la production d'énergie, avec la synthèse de deux molécules d'ATP à l'issue de la glycolyse, de deux autres au cours du cycle de Krebs, et de trente-deux autres au cours des oxydations successives des composés réduits, soit un total de 36 ATP à l'issue de la respiration cellulaire.

L'équation-bilan (simplifiée) de la respiration cellulaire (concernant la consommation de glucose ($C_6H_{12}O_6$)) est donc la suivante :

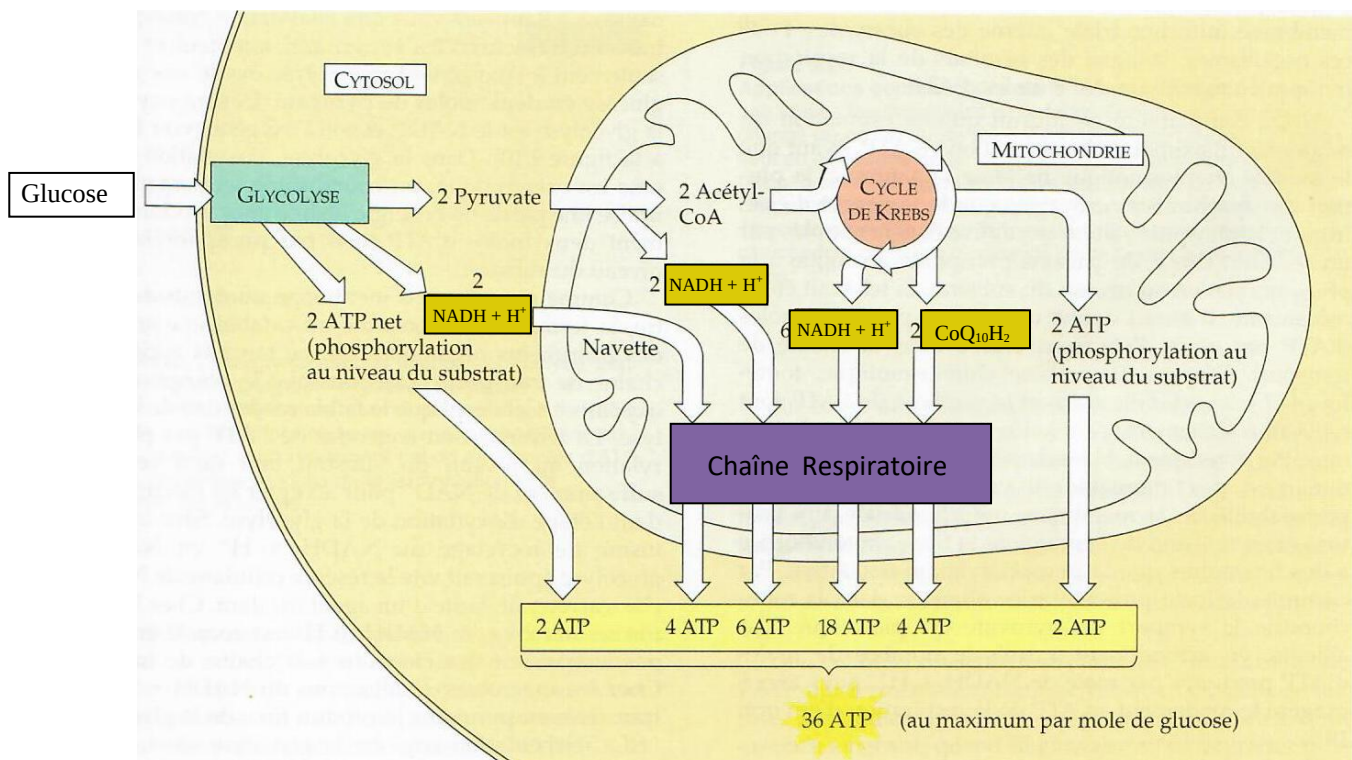


Deux schémas-bilans de la respiration cellulaire



*Les composés réduits « $R'H_2$ » représentent les coenzymes $NADH + H^+$ et $CoQ_{10}H_2$ qui interviennent lors de la respiration cellulaire

SOURCES : Manuel SVT T^{erm}S enseignement de spécialité SVT programme 2012. Bordas, 2012, ISBN : 978-2-04-732930-6, p. 41



SOURCES : Campbell, N.A.. Biologie, adaptation et révision scientifique de Richard Mathieu, De Boeck Université, 1995, ISBN DE BOECK : 2-8041-2084-8, ISBN ERPI : 2-7613-0653-8, p. 189

L'énergie produite est sous forme d'ATP, une molécule organique universelle chargée, lors de l'hydrolyse de ses liaisons phosphates, de donner un ou plusieurs de ces groupes phosphates ainsi que de l'énergie nécessaire à n'importe quelle activité cellulaire.

Enfin, certaines cellules (comme les levures, ou certaines bactéries), dans des conditions **anaérobies** (dans un milieu sans dioxygène), ne réalisent pas la respiration cellulaire mais la **fermentation** constituée de deux phases : la première est la glycolyse et la seconde est la réduction des deux molécules d'acide pyruvique soit en **éthanol (fermentation alcoolique)**, soit en **acide lactique (fermentation lactique)** et bien d'autres encore. Cependant, ces cellules produisent très peu d'énergie et donc très peu d'ATP. En effet, seule la glycolyse en produit : il y a donc un total de deux molécules d'ATP produits pour une molécule de glucose oxydée. Le rendement énergétique produit à l'issue de la fermentation est donc **dix-huit fois moins important** que celui de la respiration cellulaire.

Schéma présentant les réactions qui ont lieu lors de la fermentation alcoolique

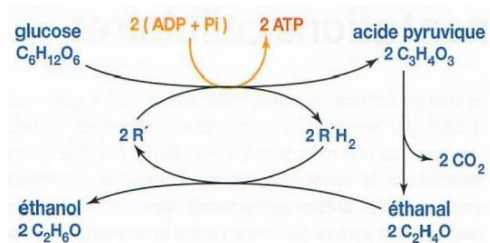
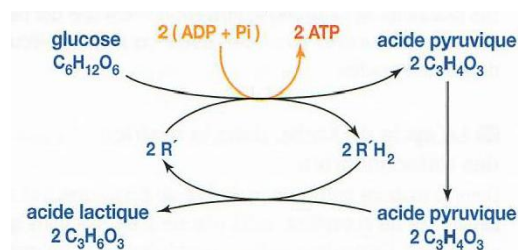


Schéma présentant les réactions qui ont lieu lors de la fermentation lactique



Les composés « R' » sont des notations génériques représentant des coenzymes NAD^+ (les composés réduits « $R'H_2$ » représentent alors des coenzymes $NADH + H^+$) qui interviennent lors de ces fermentations.

SOURCES DES 2 DOCUMENTS : Campbell, N.A.. *Biologie, adaptation et révision scientifique de Richard Mathieu*. De Boeck Université, 1995, ISBN DE BOECK : 2-8041-2084-8, ISBN ERPI : 2-7613-0653-8, p. 45

D. LE MIDICHLORIEN

Comme nous l'avons dit précédemment, dans l'univers de Star Wars, sur le plan étymologique, le mot « midichlorien » semble être le mélange des termes « mitochondrie » et « chloroplaste » et cela est appuyé par la définition du midichlorien qui est, selon Qui-Gon Jinn : « [un midichlorien] est une forme de vie microscopique qui réside dans toutes les cellules vivantes ». Ces micro-organismes, étant présents dans les cellules (eucaryotes) et assurant une fonction précise qui est le contrôle de la force, sont des organites tout comme la mitochondrie et le chloroplaste.

Nous avons également vu que la Force est un champ « d'énergie » que l'on peut considérer comme un **champ électromagnétique** (une association d'un champ électrique et d'un champ magnétique qui crée une interaction entre deux corps) car le fait de manipuler des objets à distance est similaire à l'action mécanique à distance réalisée entre deux aimants ou entre une boussole et une plaque de métal parcourue par un courant électrique. De ce fait, une concentration de midichloriens égale à celle d'un Jedi permettrait le contrôle du champ électromagnétique autour de l'individu qui peut alors contrôler n'importe quel objet (lévitation, action répulsive ou attractive, ...).

Nous avons aussi pu constater que le chloroplaste et la mitochondrie jouent chacun un rôle nécessaire à la vie de la cellule qui les héberge : il s'agit respectivement de la photosynthèse, pour sa croissance, et de la respiration cellulaire, pour produire de l'énergie.

La fusion de ces deux organites en un seul et même micro-organisme au sein d'une cellule aurait des propriétés inconnues du fait que la fusion entre deux organites n'a encore jamais été faite. On ne peut donc qu'émettre des hypothèses sur cette fusion.

Dans les parties qui vont suivre, nous considérerons que la respiration cellulaire et la photosynthèse ont la même durée dans le midichlorien (car ces durées sont inconnues) et qu'il y a autant de midichloriens que de mitochondries dans une même cellule.

1. Structure interne

La présence d'un organite résultant de la fusion d'une mitochondrie et d'un chloroplaste doit obligatoirement se faire dans une cellule car nous avons vu que la respiration cellulaire débute avec la glycolyse dans le hyaloplasme.

Quatre types de fusions seraient alors envisageables :

- L'**endosymbiose** d'un chloroplaste dans une mitochondrie ;
- L'endosymbiose d'une mitochondrie dans un chloroplaste ;
- La fusion en un grand organite compartimenté en deux sous organites qui sont une mitochondrie et un chloroplaste ;
- La fusion en un organite qui a les mêmes capacités que le chloroplaste et la mitochondrie mais qui a une structure très différente de ces derniers.

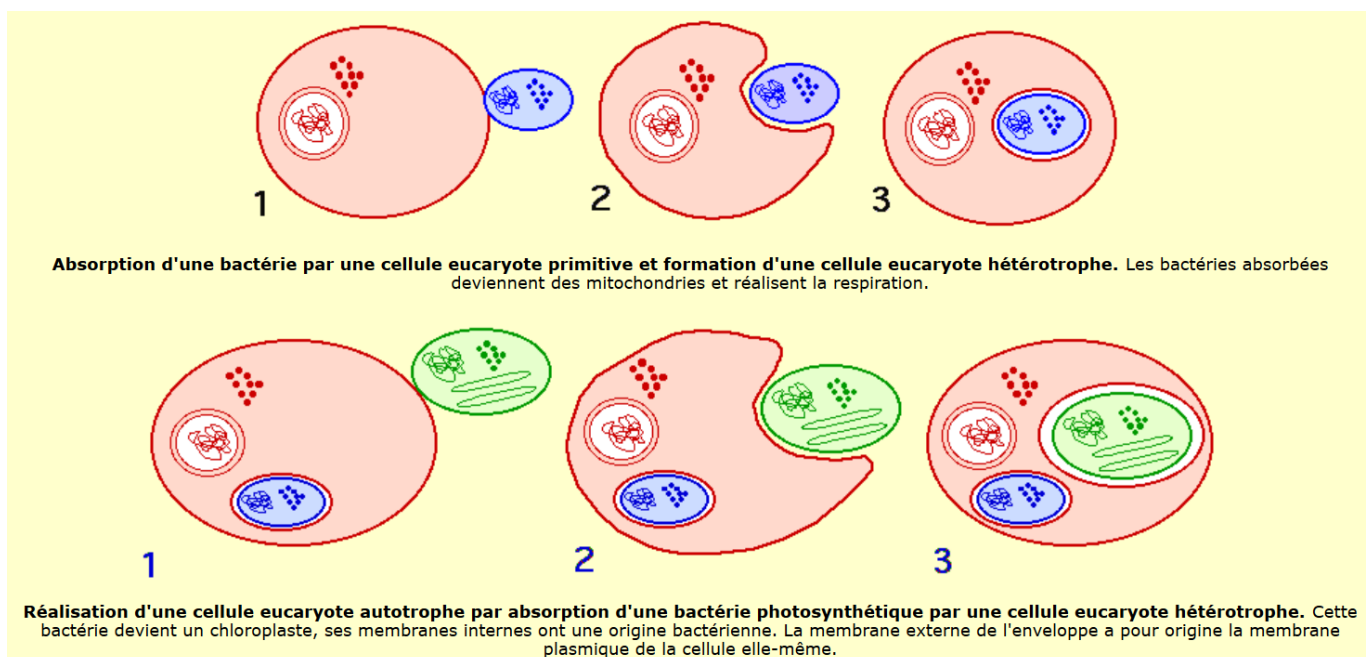
Les deux premières hypothèses sur l'endosymbiose d'un des deux organites au sein de l'autre font référence à la **théorie endosymbiotique** de Lynn Margulis (une microbiologiste américaine) acceptée dans les années 1960 par la communauté scientifique. Cette théorie suggère que les cellules eucaryotes existent non pas par complexification de leur structure par de nombreuses **mutations génétiques** (modifications dans les séquences en nucléotides de l'ADN), mais par la suite d'incorporation de cellules procaryotes par une cellule procaryote **10 à 100 fois plus grande**, appelée **cellule hôte**.

Les chloroplastes et les mitochondries auraient donc été au départ des cellules procaryotes indépendantes (capables de réaliser des phénomènes opérationnels comme capter de l'énergie lumineuse ou stocker de l'énergie chimique) qui auraient subi une **endocytose** (processus au cours duquel la membrane plasmique enveloppe et absorbe un corps issu du milieu extracellulaire) de la part d'une autre cellule procaryote **beaucoup plus grande**.

Cette théorie a été confirmée grâce à de nombreux arguments dont les principaux sont la présence d'une double membrane plasmique chez le chloroplaste et la mitochondrie, caractéristique des cellules procaryotes, et de la présence d'ADN. De ce fait, le transfert d'une partie du génome mitochondrial et du génome chloroplastique vers le noyau de la cellule hôte a permis d'obtenir la mitochondrie et le chloroplaste. La cellule hôte aurait évolué et serait devenue par la suite dépendante de ses organites et inversement. La cellule hôte ainsi que les organites vivent ainsi en **symbiose** (une association entre plusieurs êtres vivants qui s'avère bénéfique voire indispensable).

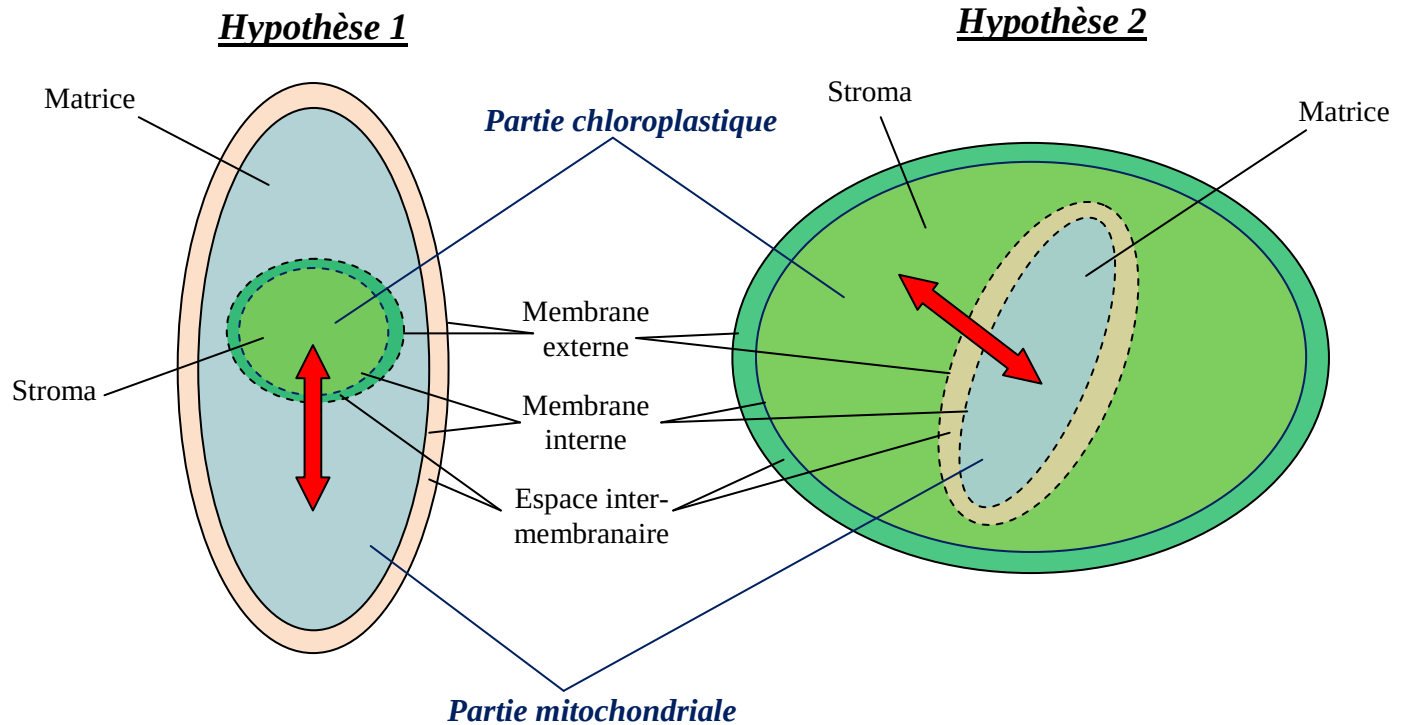
Ici, l'endosymbiose d'un chloroplaste au sein d'une mitochondrie et inversement n'aurait été possible qu'avant ou en même temps que la formation des premiers eucaryotes il y a 1,5 milliards d'années : l'ancêtre de la mitochondrie aurait été endocyté par l'ancêtre du chloroplaste (plus grand) ou inversement. Cette nouvelle cellule aurait ensuite été endocytée par une cellule procaryote hôte qui aurait pu ainsi contenir un organe particulier : le midichlorien (ce midichlorien aurait donc un génome propre à lui qui aurait été transporté vers le noyau de la cellule hôte, tout comme la mitochondrie et le chloroplaste). Il faudrait également que l'organe endocyté ait des pores différentes (par rapport aux organites de référence) sur ses doubles membranes plasmiques afin d'accueillir plus de matière différente comme le glucose et le dioxygène pour la partie mitochondriale ou le dioxyde carbone et l'eau pour la partie chloroplastique (en somme, pour faciliter les échanges de matière). Mais l'hypothèse sur cette endosymbiose est la moins plausible car la mitochondrie et le chloroplaste ont sensiblement la même taille, ce qui ne faciliterait pas l'endosymbiose de l'un dans l'autre.

Schéma présentant la théorie endosymbiotique



SOURCES : Prat Roger, Vonarx Véronique. La structure du chloroplaste, la théorie endosymbiotique.
<http://www.snv.jussieu.fr/bmedia/Chloroplaste/endosymbiose.htm>

Schéma présentant la structure interne d'un midichlorien (respectivement selon la première puis la deuxième hypothèse) et les échanges de matière entre la partie chloroplastique et la partie mitochondriale



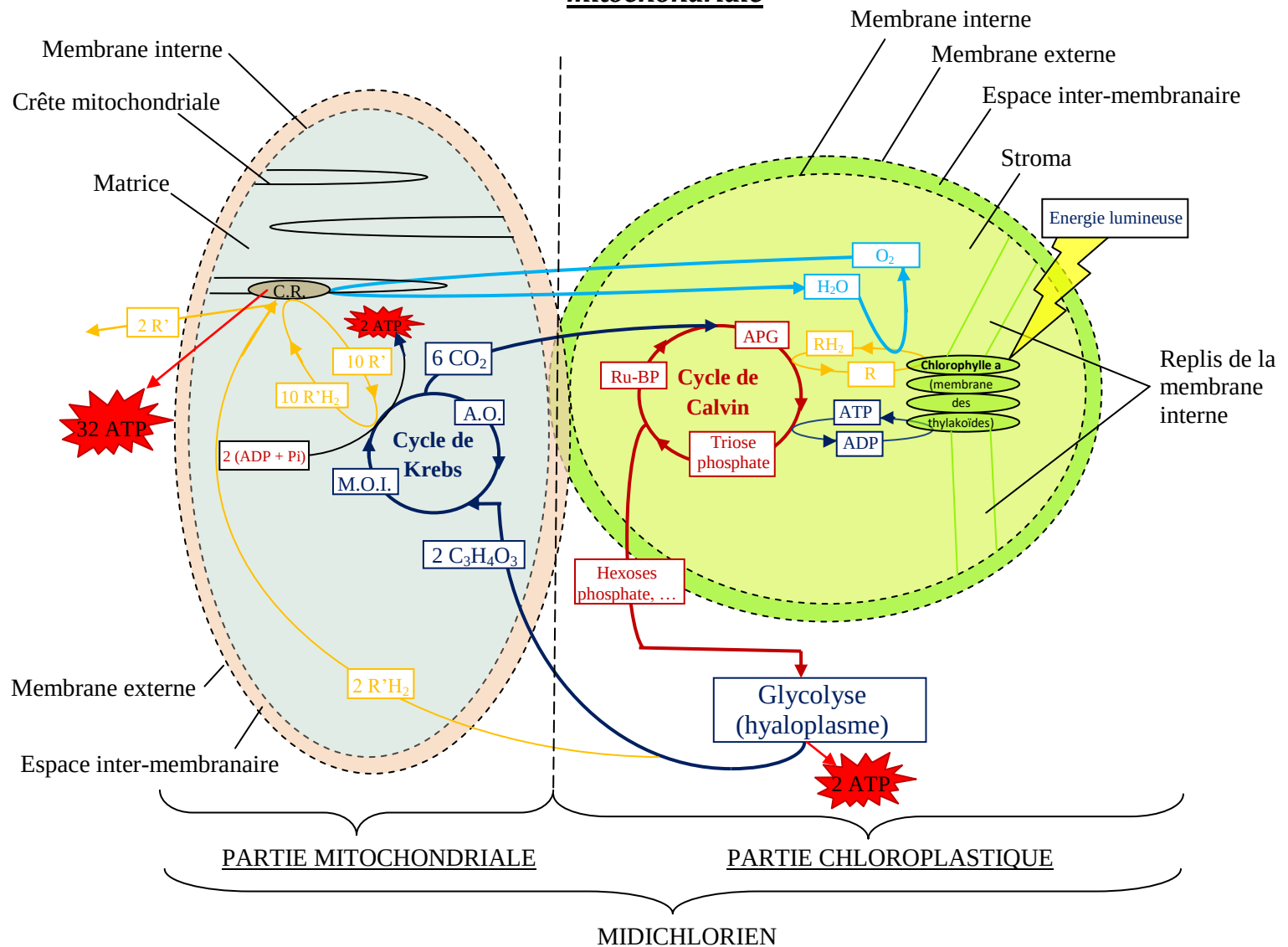
Légende :

 Echanges de matière entre la partie chloroplastique et la partie mitochondriale (cette flèche représente tout ce qui est présent dans le schéma suivant (cf. p. 34) (concernant la troisième hypothèse))

----- Membrane avec des pores différentes

La troisième hypothèse sur la fusion en un grand organe compartimenté en deux sous organites qui sont une mitochondrie et un chloroplaste permettrait d'obtenir ces deux organites accolés entre eux mais ayant des parois avec des pores pour permettre un échange de matière comme le glucose vers la partie mitochondriale ou du dioxyde de carbone et de l'eau vers la partie chloroplastique.

Schéma simplifié présentant une structure interne possible d'un midichlorien (selon la troisième hypothèse) et les échanges de matière entre la partie chloroplastique et la partie mitochondriale



La dernière hypothèse permettrait d'obtenir un organite ayant une forme inconnue mais possédant les mêmes propriétés que la mitochondrie et le chloroplaste. Cette hypothèse est la moins probable car elle tend à dire que la matrice et le stroma seraient mélangés, tout comme les crêtes mitochondriales avec les thylakoïdes, ce qui ne faciliterait pas les étapes de la photosynthèse et de la respiration cellulaire.

Cependant, concernant la **troisième** et la **quatrième hypothèse**, l'existence de ces midichloriens n'aurait été possible elle aussi qu'avant ou en même temps que la formation des premiers eucaryotes il y a 1,5 milliards d'années : l'ancêtre de la mitochondrie aurait fusionné avec l'ancêtre du chloroplaste puis cette nouvelle cellule aurait été endocytée par une cellule procaryote hôte qui aurait ainsi pu contenir un organite particulier : le midichlorien (ce midichlorien aurait donc un génome propre à lui qui aurait été transporté vers le noyau de la cellule hôte, tout comme la mitochondrie et le chloroplaste). Il faudrait également que les deux organites fusionnés aient des pores différentes sur leurs doubles membranes plasmiques afin d'accueillir plus de matière comme le glucose et le dioxygène pour la partie mitochondriale ou le dioxyde carbone et l'eau pour la partie chloroplastique (pour faciliter les échanges de matière).

2. Le contrôle du champ électromagnétique externe serait-il alors possible grâce aux midichloriens ?

Comme nous l'avons vu dans les parties précédentes, le chloroplaste abrite, uniquement en présence d'énergie lumineuse, le processus de photosynthèse en consommant du dioxyde de carbone et de l'eau et en produisant du dioxygène et de la matière organique, notamment du glucose. A l'inverse, la mitochondrie consomme du dioxygène et du glucose pour produire du dioxyde de carbone, de l'eau et de l'énergie sous forme d'ATP (en très grande quantité).

De ce fait, si le midichlorien respecte une des quatre hypothèses que nous avons formulées précédemment, on obtiendrait alors un organite quasi indépendant (on dit « quasi indépendant » car la glycolyse a lieu dans le hyaloplasme de la cellule et non au sein de la mitochondrie).

En admettant qu'il y ait autant de midichloriens que de mitochondries dans une même cellule (ni reproductrice, ni sanguine), la quantité d'énergie produite serait alors multipliée par deux, ce qui est considérable !

En effet, en partant du principe qu'il y ait 25 mitochondries et 25 midichloriens dans une même cellule, 800 molécules d'ATP seraient alors produites grâce aux mitochondries (car une mitochondrie en produit 32), 800 autres grâce aux midichloriens, et 100 autres dans le hyaloplasme (car deux molécules de glucoses seraient réduites et 4 ATP produits pour une seule mitochondrie et un seul midichlorien simultanément), soit un total de 1 700 molécules d'ATP produites pour 50 molécules de glucoses consommées au lieu de 850 molécules d'ATP pour 25 molécules de glucoses consommées (s'il y a uniquement 25 mitochondries).

On obtiendrait alors un rendement énergétique d'environ $1,41 \times 10^{-19}$ kJ en présence de midichloriens au lieu de $7,05 \times 10^{-20}$ kJ (soit la moitié) uniquement en présence de mitochondries, ce qui montre bien que le rendement énergétique est doublé.

Par ailleurs, pour 25 midichloriens, si les matières sont capables d'être échangées dès leur production, 25 molécules de glucose seraient produites grâce à la partie chloroplastique et 25 autres (correspondant au nombre de mitochondries) seraient issus d'un apport externe, ce qui ne change rien en l'état actuel d'un organisme hétérotrophe.

De plus, 150 molécules d'eau et 150 molécules de dioxyde carbone seraient libérées par les mitochondries et aucune par les midichloriens car ces molécules d'eau et

de dioxyde de carbone seraient totalement consommées par la partie chloroplastique pour produire les molécules de glucose.

En l'absence de lumière, aucune molécule de glucose ne serait produite : les besoins de la cellule en glucose vont alors être multipliés par deux.

On peut donc déduire que le nombre de midichloriens n'influence en aucun cas la quantité de déchets produits (CO_2 , H_2O et O_2) sauf la quantité d'énergie et de glucose nécessaire la nuit qui est alors doublée (s'il y a autant de midichloriens que de mitochondries).

En effet, dans un cas plus général, la partie chloroplastique d'un midichlorien, en présence de lumière, va réaliser le processus de photosynthèse et va produire 6 molécules de dioxygène et une molécule de glucose. Ces 6 molécules de dioxygène vont alors se diriger vers la partie mitochondriale alors que la molécule de glucose va se diriger vers le hyaloplasme de la cellule pour produire 2 molécules d'ATP et 2 molécules d'acide pyruvique qui vont à leur tour se diriger vers la partie mitochondriale du midichlorien. Les deux étapes de la respiration cellulaire vont avoir lieu pour produire 6 molécules de dioxyde de carbone, 6 molécules d'eau et 34 molécules d'ATP. Les 6 molécules d'eau et les 6 molécules de dioxyde de carbone vont se diriger vers la partie chloroplastique qui va donc réaliser la photosynthèse et ainsi de suite ...

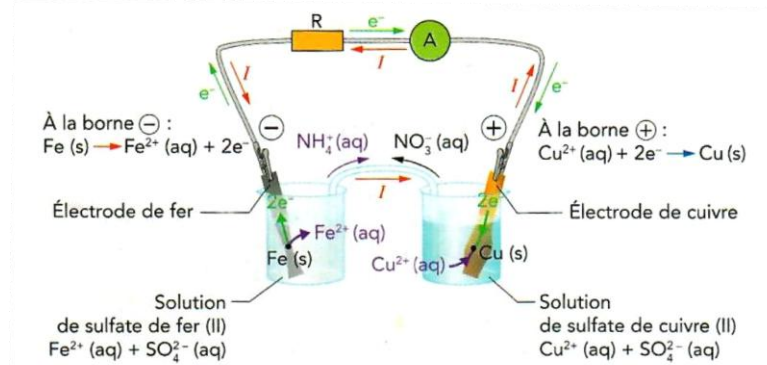
En l'absence de lumière, la partie chloroplastique de chaque midichlorien ne va pas fonctionner : les besoins nutritionnels de la cellule vont alors augmenter.

L'énergie produite est sous forme d'ATP et on a vu que l'hydrolyse de ses groupes phosphates libère de l'énergie chimique. De ce fait, plus il y aurait de midichloriens, plus la quantité d'ATP et donc d'énergie chimique augmenterait, ce qui permettrait à la cellule de faire plus d'activités cellulaires qu'en temps normal (d'un point de vue quantitatif).

Cependant, la production d'énergie chimique ne permettrait pas le contrôle du champ électromagnétique externe car la mitochondrie, tout comme le chloroplaste, et par conséquent le midichlorien, ne permettent pas à l'être qui les héberge de produire directement un champ électromagnétique afin de contrôler un corps, qu'il soit proche ou éloigné (dans la réalité).

Mais cette question sur la possibilité de contrôler un objet à distance grâce à un organite capable de produire de l'énergie ouvre sur d'autres hypothèses. En effet, dans l'univers de *Star Wars*, le plus probable serait que ce midichlorien ne permette pas non plus de produire un champ électromagnétique mais l'énergie produite par cet organite servirait à la production d'un champ électromagnétique grâce à un organe spécialisé, au même titre que le cœur pour assurer la circulation sanguine, ou les poumons pour la circulation respiratoire. Cet organe nécessiterait une certaine quantité d'énergie qui pourrait être fournie grâce aux midichloriens, dans la mesure où ils seraient assez nombreux (ce qui est le cas chez les Jedi) (pour des raisons de complexité, c'est peut-être pour cette raison qu'il y a eu un « raccourci » de la part du réalisateur en disant que ce sont les midichloriens qui permettent le contrôle du champ électromagnétique externe). Cet organe spécialisé serait potentiellement constitué d'**électrocytes** (des cellules capables de produire un courant électrique comme chez les anguilles, les torpilles ou les gymnotes) ou bien d'une cellule eucaryote inexistante dans la réalité, de structure inconnue et qui se comporterait comme une **pile (Daniell)** (cf. schéma p.37) ou Voltaïque) en utilisant et en convertissant l'énergie chimique produite par les midichloriens, sous forme d'ATP, en énergie électrique afin de créer un champ électrique, ce qui créerait une interaction électromagnétique entre un être humain et un objet seulement réceptif au champ électromagnétique.

Schéma présentant le fonctionnement d'une pile Daniell



SOURCES : Manuel Physique-chimie 1^{ère} S programme 2011, Observer >

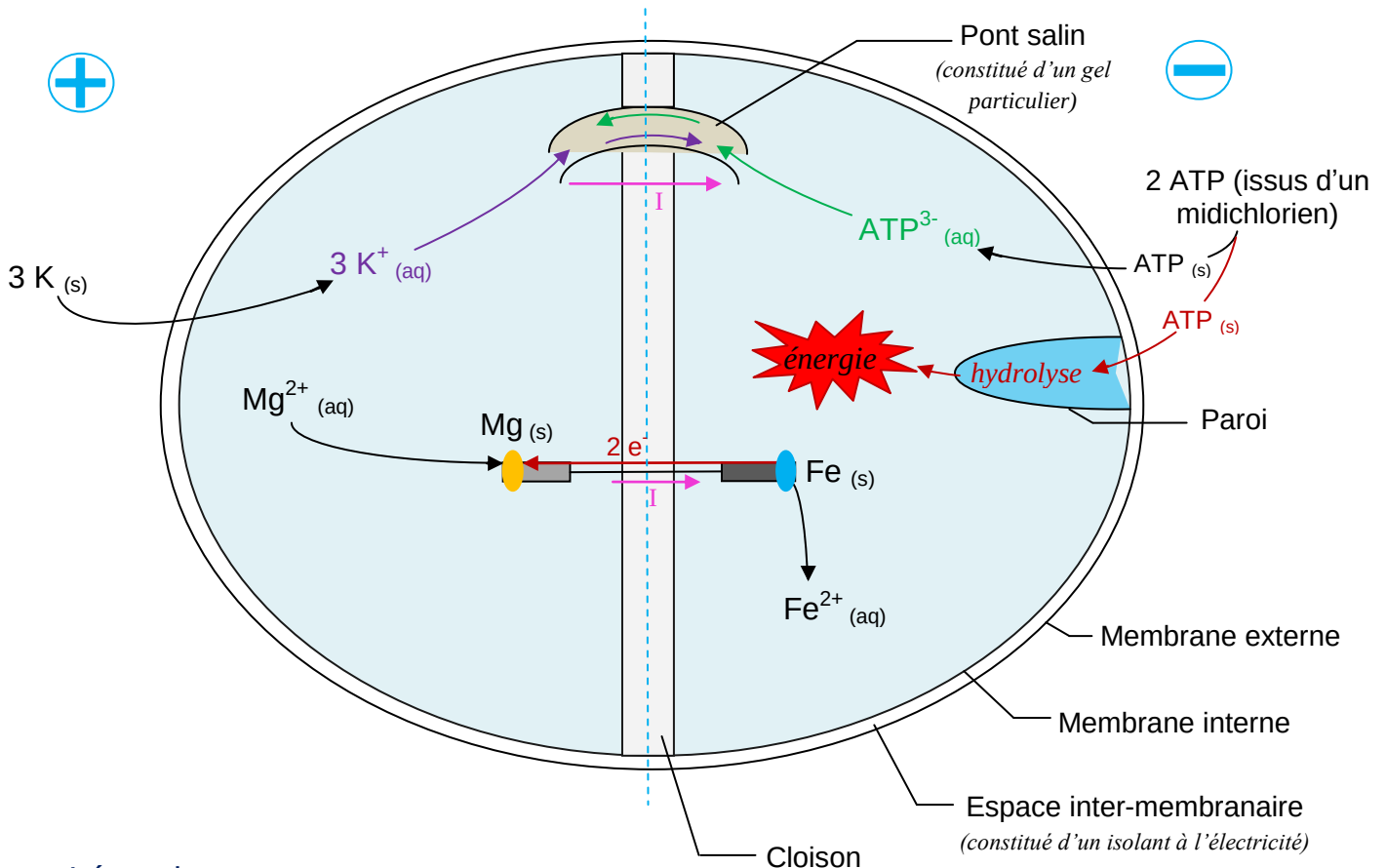
Comprendre > Agir, Hachette, 2011, ISBN : 978-2-01-135535-5, p. 290

Dans la réalité, l'être humain produit un champ électromagnétique (mais il est extrêmement faible et ne permettrait, en aucun cas contrôler un objet à distance et encore moins un objet voulu). Cette production de champ électromagnétique par le corps humain est possible notamment grâce aux contractions du cœur qui créent des décharges électriques (mesurables grâce à un électrocardiogramme) comme d'autres parties du corps (le cerveau, etc). Cela est également renforcé par la production de champ magnétique, produit notamment par le cerveau qui renferme des cristaux magnétite (un minéral sensible au magnétisme) dans ses différents lobes (pariétal, frontal, ...).

De ce fait, on pourrait imaginer que toutes les cellules de cet organe spécialisé dans la production d'un champ électrique se comporteraient exactement comme une pile Daniell : chaque cellule serait divisée en deux cavités constituées d'une solution aqueuse (donc d'eau) d'ions hydrogénophosphate (une molécule organique) et séparées entre elles par une cloison mais reliées entre elles uniquement par un **pont salin** (un tube contenant une solution gélifiée particulière et assurant une liaison entre deux demi-cellules afin d'équilibrer les charges grâce aux anions et cations qui y circulent). De plus, chaque cavité de la cellule contiendrait une sorte de « barre en métal » reliées par une sorte de « fil de connexion » traversant la cloison. D'un côté de la cellule, la « barre » serait constituée de fer (Fe), et de l'autre côté, une autre « barre » serait constituée de magnétite* (constituée entre autre de magnésium (Mg) (que nous considérerons comme seul constituant de la magnétite pour des raisons de complexité)) car ces deux constituants sont conducteurs et sensibles au magnétisme. Il y aurait donc une demi-équation d'oxydoréduction dans chacune des cavités de la cellule accompagnée d'une production d'électricité assurée par les mouvements des ions dans le pont salin (un **cation** (un ion chargé positivement) et un **anion** (un ion chargé négativement)) et des électrons circulant dans le « fil de connexion » et issus des demi équations d'oxydoréduction. Par ailleurs, dans le corps, il existe des ions de l'ATP comme l'ion ATP^{3-} ou l'ion ATP^{4-} . Ainsi, le cation circulant dans le pont salin serait, par exemple, un ion potassium K^+ et l'anion serait un ion ATP^{3-} formé de la réaction d'ATP (provenant d'un midichlorien) avec la solution d'hydrogénophosphate. Tout ce système fonctionnerait ainsi comme une pile en convertissant l'énergie chimique en énergie électrique issue des mouvements des cations et anions dans le pont salin et de la circulation des électrons dans le « fil de connexion » (bien sûr, tous les constituants de cette hypothétique cellule seront des constituants du corps humain, c'est pourquoi nous utilisons le potassium, l'ATP, l'hydrogénophosphate, etc). Cette cellule exercerait tout cela en consommant de **l'énergie chimique sous forme d'ATP provenant des midichloriens** (en plus d'utiliser des ions ATP^{3-} pour produire de l'électricité).

*La présence de magnétite est une hypothèse formulée par moi-même car, en général, les métaux utilisés dans une pile Daniell sont le fer (Fe) et le zinc (Zn) ou le fer et le cuivre (Cu).

Schéma présentant le fonctionnement d'une cellule constituant l'organe spécialisé dans la production d'électricité



Légende :



Solution de $\text{HPO}_4^{2-}(\text{aq})$ (ion hydrogénophosphate) constituée de très peu d'eau



Lieu spécial de la cellule uniquement constitué d'eau pour permettre la production d'énergie chimique nécessaire à « activer la cellule »



« Barre » en métal dans la partie droite (appelée **anode**) constituée de Fer ($\text{Fe}_{(\text{s})}$)



« Barre » en métal dans la partie gauche (appelée **cathode**) constituée de magnésium ($\text{Mg}_{(\text{s})}$) de magnétite



« Fil de connexion » reliant les deux « barres en métal »

(aq)

Signifie « solution **a**queuse » (donc dissoute dans l'eau)

(s)

Signifie « **s**olide »



1^{ère} demi-réaction d'oxydoréduction : $\text{Fe}_{(\text{s})} \rightleftharpoons \text{Fe}^{2+}_{(\text{aq})} + 2 \text{e}^-$



2^{nde} demi-réaction d'oxydoréduction : $\text{Mg}^{2+}_{(\text{aq})} + 2 \text{e}^- \rightleftharpoons \text{Mg}_{(\text{s})}$

2e^-



Sens de circulation des électrons



« Borne positive » de la cellule



« Borne négative » de la cellule



Sens de circulation des 3 cations K^+



Sens de circulation de l'anion ATP^{3-}



Sens de circulation du courant produit

I



Energie chimique produite par l'hydrolyse de la molécule d'ATP (produite préalablement par un midichlorien) nécessaire au fonctionnement de la cellule

Grâce à des études expérimentales (dont nous considérerons les conditions (température, pression, pH, ...) similaires à celles existant dans la cellule étudiée pour des raisons de complexité), on sait désormais que le potentiel E_1^0 standard (noté E^0 et exprimé en volts (V)) (que nous considérerons donc comme identique au cas de cette cellule) de demi-réaction d'oxydoréduction des ions fer (II) et du fer est :

$$E_1^0 = E_{\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}}^0 = -0,44 \text{ V}$$

On sait également que le potentiel E_2^0 de demi-réaction d'oxydoréduction du magnésium et de l'ion magnésium (II) est :

$$E_2^0 = E_{\text{Mg}^{2+}/\text{Mg}}^0 = -2,37 \text{ V}$$

On peut ainsi remarquer que $E_1^0 > E_2^0 \Leftrightarrow E_{\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}}^0 > E_{\text{Mg}^{2+}/\text{Mg}}^0 \Leftrightarrow -0,44 \text{ V} > -2,37 \text{ V}$

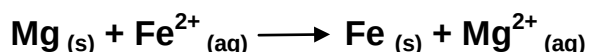
et que $E_1^0 - E_2^0 = E_{\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}}^0 - E_{\text{Mg}^{2+}/\text{Mg}}^0 = -0,44 - (-2,37) = 1,9 \text{ V} = U_{\text{cellule}}$ et $1,9 > 0$

Le potentiel d'oxydoréduction de la première demi-équation d'oxydoréduction étant supérieur au second et l'écart entre ces deux potentiels ($E_1^0 - E_2^0$) étant positif, cette réaction est donc plausible. Cet écart correspondant à la tension U de la cellule étudiée est donc de 1,9 V.

On peut donc déduire que si l'organe spécialisé dans la production d'un champ électrique chez le Jedi est constitué de n cellules spécialisées, alors cet organisme produirait $1,9 \times n \text{ Volts}$ pour une équation d'oxydoréduction par cellule. Par exemple, si l'organe est constitué de 1 000 cellules, alors il produirait $1,9 \times 10^3 \text{ V} = 1,9 \text{ kV}$ pour une équation d'oxydoréduction par cellule, ce qui est considérable ! En effet, la tension aux bornes d'une prise secteur est, en moyenne, de $U_{\text{prise secteur}} = 230 \text{ V}$, or la cellule étudiée produit $U_{\text{cellule}} = 1\,900 \text{ V}$, soit environ 8 fois plus (car $\frac{U_{\text{cellule}}}{U_{\text{prise secteur}}} = \frac{1\,900}{230} \approx 8$).

De plus, afin d'éviter tout risque d'auto-électrocution et toute perte d'électricité, il faudrait que l'espace inter-membranaire de chaque cellule soit constitué d'un isolant à l'électricité (comme le bois, le papier, ... choses qui ne constituent pas le corps malheureusement : il faudrait donc un isolant organique qui n'existe pas dans la réalité).

Par ailleurs, l'équation-bilan d'oxydoréduction du Fer et des ions magnésium (II) est :



L'équation-bilan qui a lieu dans la cellule est donc :



On constate ainsi que le fer est consommé à chaque réaction et qu'il faut que certains atomes de fer constituant le corps humain soient rassemblés sous forme de « barre métallique » grâce à un procédé inconnu. Il en va de même pour la production du « fil de connexion » (qui résulterait d'un processus lui aussi inconnu). De plus, les résultats que nous avons obtenus sont uniquement hypothétiques car une pile fonctionnant à l'aide d'ions ATP^{3-} et d'une réaction d'oxydoréduction de fer et d'ions magnésium n'a jamais existé. Enfin, s'agissant d'une cellule eucaryote, cette dernière contient obligatoirement des organites et d'autres constituants, choses que nous avons négligées.

L'énergie électrique produite devrait également être stockée dans un endroit particulier du corps (peut-être dans le même organe spécialisé) afin de pouvoir l'exploiter. En effet, cet endroit se comporterait tel un « condensateur » relié au cerveau grâce à des nerfs (de la même manière qu'un muscle) afin que, selon la volonté du Jedi, une certaine

quantité d'énergie électrique produite par ces cellules se dirige vers le condensateur. L'électricité produite par ces cellules se dirigerait au « condensateur » via un « fil de connexion » qui posséderait une sorte de diode « branchée en série » afin que le courant circule à sens unique : celui de la cellule vers le « condensateur » pour permettre une optimisation du rendement électrique (car l'électricité circule dans les deux sens sans qu'un dipôle spécialisé n'intervienne). De préférence, ce « condensateur » devrait être situé dans les doigts car le champ électrique est très intense au niveau des extrémités pointues (comme un parafoudre) : c'est ce qu'on appelle **l'effet de pointe** (il faudrait également que, lors de la libération de décharges électriques, le Jedi s'isole du sol au moyen de dispositifs spéciaux (semelles très hautes en caoutchouc, ...). Il y aurait donc dix petits condensateurs qui, en fonction de la quantité d'électricité qu'ils contiennent et de l'humidité de l'air, permettraient soit le contrôle du champ électromagnétique sur un objet (**seulement réceptif au champ électromagnétique, donc conducteur et magnétisable**, mais cet objet ne serait en aucun cas en lévitation : il serait soit repoussé, soit attiré) car les doigts joueraient le rôle d'aimant (dans le cas où les décharges libérées par ces condensateurs soient inférieure à la capacité d'isolation de l'air à l'électricité), soit l'émission d'électricité sous forme d'éclairs et donc visibles à l'œil nu (dans le cas où les décharges libérées par les condensateurs soient supérieures à la capacité d'isolation de l'air à l'électricité), comme on peut le voir dans l'affrontement entre Luke Skywalker et l'Empereur Dark Sidious dans l'épisode **VI LE RETOUR DU JEDI**. En plus de cela, toutes ces activités nécessiteraient de l'énergie sous forme d'ATP provenant des midichloriens.

Photographie présentant l'Empereur Dark Sidious émettant de l'électricité grâce à la Force (épisode VI)



SOURCES : Youtube. <https://www.youtube.com/watch?v=PqaiKmm8gsY>

Photographie présentant Anakin Skywalker utilisant la Force sur un fruit (épisode II)



SOURCES : https://hitek.fr/actualite/effets-speciaux-inutiles-dans-les-films_6341

Enfin, on a vu précédemment que le chloroplaste doit être en contact direct avec la lumière pour que la photosynthèse ait lieu. Un midichlorien ne peut donc pas se situer dans n'importe quelle cellule : il ne peut pas être contenu dans une cellule à l'intérieur du corps (cellules musculaires, du foie, ...), mais à sa surface comme la peau qui est la partie

du corps la plus favorable. Mais, en présence de vêtements chez l'Homme, le processus de photosynthèse des cellules protégées par les vêtements ne peut pas se dérouler. Dans le cas où la surface du corps est totalement recouverte de vêtements, les besoins nutritionnels de l'individu vont alors augmenter. De plus, la présence de chlorophylle dans le midichlorien colorerait la peau de l'être qui les héberge en vert et c'est peut-être pour cette raison que Maître Yoda (*qui possédait le plus grand nombre de midichloriens, jusqu'à la découverte d'Anakin Skywalker*) est vert ...

Photographie présentant Maître Yoda

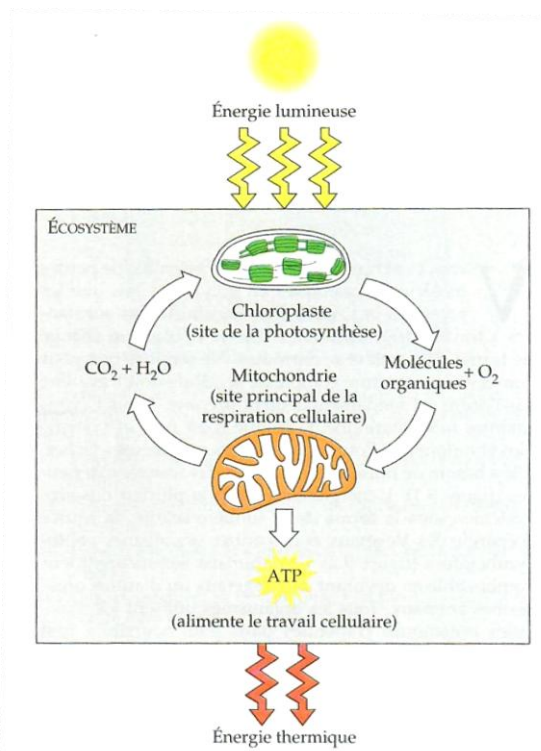


SOURCES : https://www.google.fr/search?q=ma%C3%A9tre+Yoda&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwi5qPnygdffAhWpxoUKHWFNBUQ_AUIDigB#imgrc=rgMrtNkSMjxvmM:

E. CONCLUSION

On peut donc conclure que le midichlorien résulte de la fusion d'une mitochondrie et d'un chloroplaste, deux organites caractéristiques de la cellule eucaryote. Ces deux organites réalisent, uniquement en présence de lumière, des échanges de matière « complémentaires » ce qui explique pourquoi leur fusion donnerait un organite quasi indépendant et présentant une situation de symbiose.

Schéma présentant les échanges de matière entre un chloroplaste et une mitochondrie au sein d'un écosystème



SOURCES : Campbell, N.A.. *Biologie, adaptation et révision scientifique de Richard Mathieu*. De Boeck Université, 1995, ISBN DE BOECK : 2-8041-2084-8, ISBN ERPI : 2-7613-0653-8, p. 174

Ni la mitochondrie ni le chloroplaste ne permettent à l'être qui les héberge de jouer le rôle d'aimant et de contrôler le champ électromagnétique externe. Par conséquent, il en va de même pour le midichlorien qui ne peut pas produire voire contrôler le champ électromagnétique externe directement. Le contrôle de ce champ électromagnétique ne serait possible que grâce à un organe spécialisé (constitué soit d'électrocytes soit de cellules fonctionnant comme une pile Daniell), capable d'en produire, mais, dans la réalité, le champ produit ne permettrait pas de contrôler n'importe quel objet du fait qu'il faut respecter de nombreux facteurs : la distance, la constitution de l'objet (conducteur ou non, magnétique ou non), le risque d'auto-électrocution ...

Si n'importe quel objet convoité peut être en lévitation grâce au contrôle du champ électromagnétique externe réalisé par un Jedi, cela reste possible dans le cadre de la science-fiction et se rapproche également de la **télékinésie** (faculté, hypothétique, de contrôler un objet, de la matière, à distance grâce à la pensée) ...

Le midichlorien, bien que n'existant pas dans notre univers, ne pourrait être réalisable qu'artificiellement mais grâce à des procédés et mécanismes très, voire trop, complexes et inconnus (pour l'instant) ...

F. ANNEXE

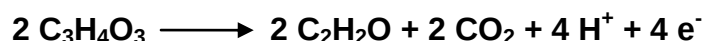
*1. Les étapes du cycle de Krebs

Les deux molécules d'acide pyruvique produits lors de la glycolyse vont traverser les deux membranes limitantes de la mitochondrie pour se retrouver dans la matrice mitochondriale. Une fois dans la chambre interne de la mitochondrie, ces deux molécules d'acide pyruvique vont être totalement dégradées au cours d'une succession de réactions biochimiques complexes qui constituent un cycle appelé « Cycle de Krebs ». Ce cycle est constitué de dix étapes avec une en plus qui est étape préalable.

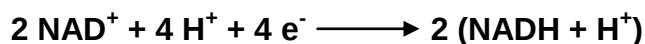
- Étape préalable : la décarboxylation couplée de l'oxydation des deux molécules d'acide pyruvique

Dans la matrice mitochondriale, juste avant d'entrer dans le Cycle de Krebs, les deux molécules d'acide pyruvique vont subir simultanément deux réactions chimiques : une décarboxylation et une oxydation en réagissant avec quatre coenzymes dont 2 NAD^+ et un autre coenzyme appelé **coenzyme A** (abrégé en **CoA** (ou CoA-SH)) lui aussi au nombre de deux, pour former deux molécules de CO_2 , deux molécules d'**acétyl-CoA** (chacune composée d'un CoA et d'un dérivé de l'acide acétique) et de 2 ($\text{NADH} + \text{H}^+$). On obtient ainsi :

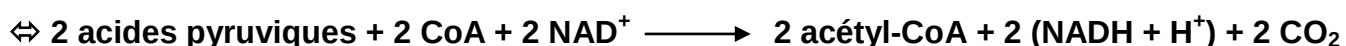
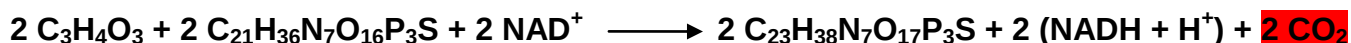
- La demi-équation d'oxydation et de décarboxylation des deux molécules d'acide pyruvique :



- La demi-équation de réduction des deux coenzymes NAD^+ :



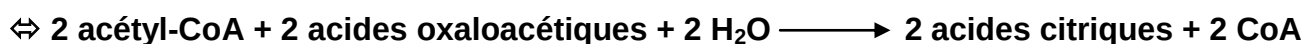
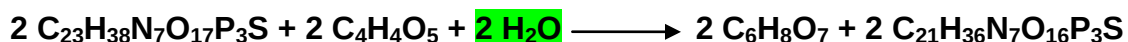
- L'équation-bilan de l'étape préalable du cycle de Krebs :



(Cette demi-équation fonctionne dans les deux sens mais dans le cas de la respiration cellulaire, nous ne nous intéresserons qu'à ce sens-là)

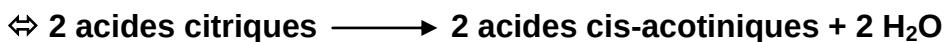
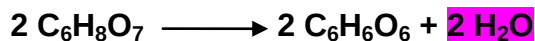
- Étape 1 : la fixation des deux molécules d'acétyl-CoA sur leur accepteur organique

Les 2 acétyl-CoA vont se fixer sur leur accepteur organique, l'**acide oxaloacétique** (au nombre de deux) et réagir avec deux molécules d'eau, pour permettre la synthèse de deux molécules d'**acide citrique** et la libération des 2 CoA. On obtient donc :



- Étape 2 : la déshydratation des deux molécules d'acide citrique

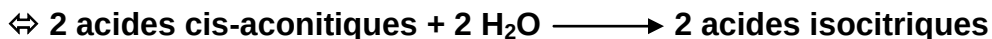
Les deux molécules d'acide citrique vont être **déshydratées**. Cette déshydratation va former deux molécules d'**acide cis-aconitique**. On a donc :



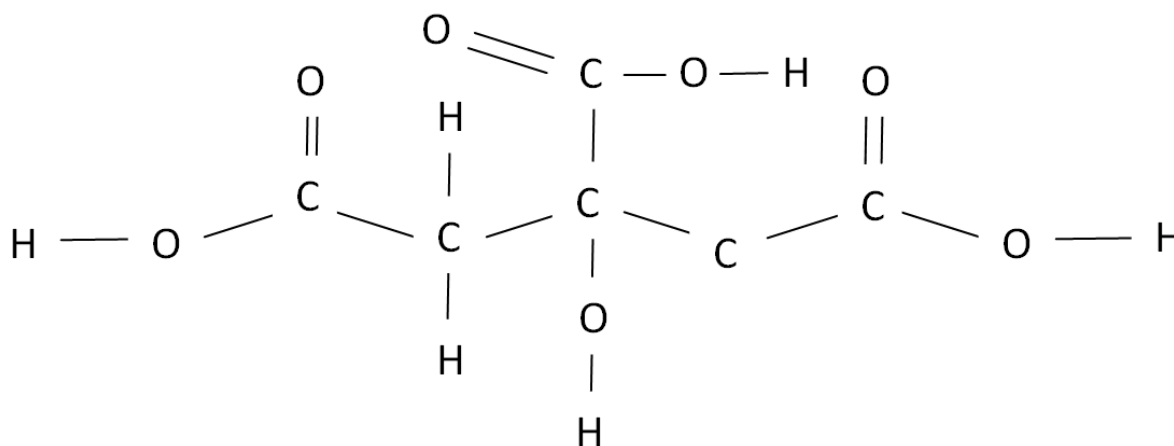
(Cette déshydratation fonctionne dans les deux sens mais dans le cas de la respiration cellulaire, nous ne nous intéresserons qu'à ce sens-là)

- Étape 3 : l'hydratation des deux molécules d'acide cis-acotinique

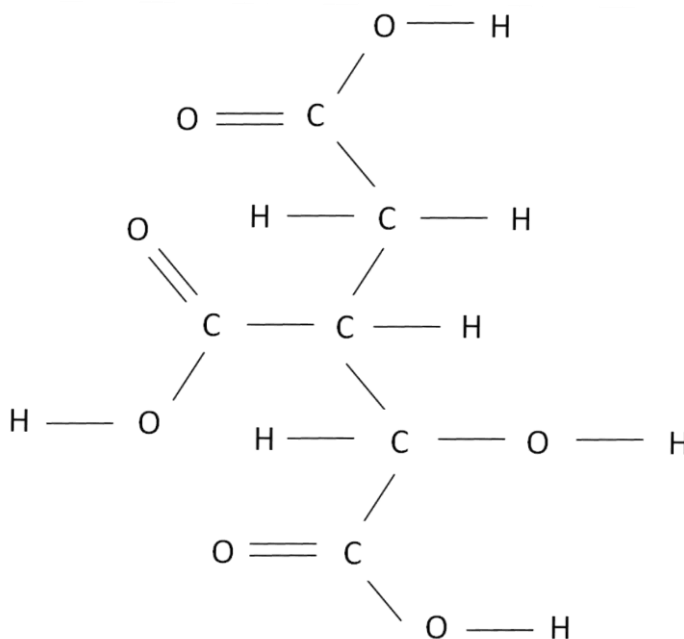
Les deux molécules d'acide cis-acotinique vont être **hydratées**. Cette hydratation va former deux molécules isomères de l'acide citrique appelées **acides isocitriques**. On a ainsi :



- Formule développée d'une molécule d'acide citrique :



- Formule développée d'une molécule d'acide isocitrique :



Grâce à ces deux formules développées, on peut confirmer que l'acide isocitrique est bien un isomère de l'acide citrique (du fait qu'ils ont tous les deux la même formule brute mais la répartition spatiale de leurs atomes est différente).

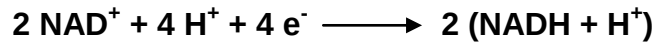
- Étape 4 : l'oxydation des deux molécules d'acide isocitrique

Les deux molécules d'acide isocitrique vont être oxydées par 2 NAD⁺ pour former deux molécules d'**acide oxalosuccinique**. On obtient ainsi :

- La demi-équation d'oxydation des deux molécules d'acide isocitrique :

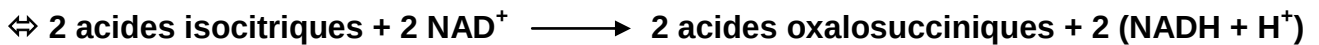
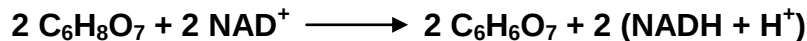


- La demi-équation de réduction des deux coenzymes NAD⁺ :



(Ces deux demi-équations fonctionnent dans les deux sens mais dans le cas de la respiration cellulaire, nous ne nous intéresserons qu'à ce sens-là)

- L'équation-bilan de cette 4^{ème} étape du cycle de Krebs :



- Étape 5 : la décarboxylation des deux molécules d'acide oxalosuccinique

Les deux molécules d'acide oxalosuccinique sont décarboxylées pour former deux molécules de CO₂ et deux molécules d'acide **α-cétoglutarique**. On a donc :



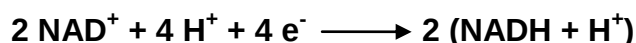
- Étape 6 : la décarboxylation couplée de l'oxydation des deux molécules d'acide α-cétoglutarique

Les deux molécules d'acide α-cétoglutarique sont à la fois oxydées en réagissant avec 2 NAD⁺ et décarboxylées pour former 2 (NADH + H⁺) et 2 CO₂. Il y a aussi formation de deux molécules appelées **succinyl-CoA** grâce à la réaction des deux molécules d'acide α-cétoglutarique oxydées et de 2 CoA. On obtient :

- La demi-équation de décarboxylation et d'oxydation des deux molécules d'acide α-cétoglutarique :

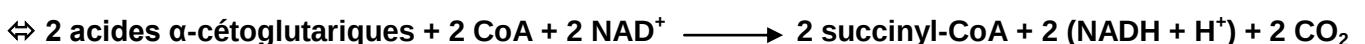
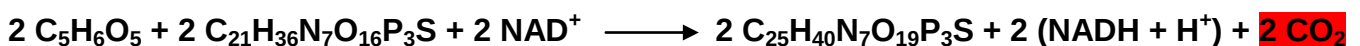


- La demi-équation de réduction des deux coenzymes NAD⁺ :



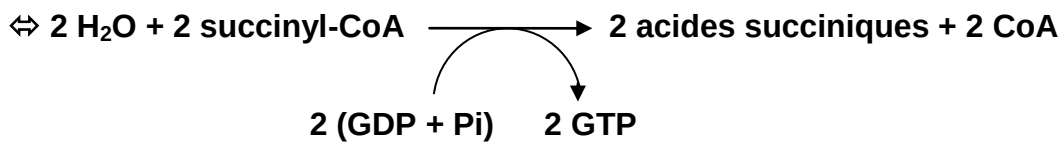
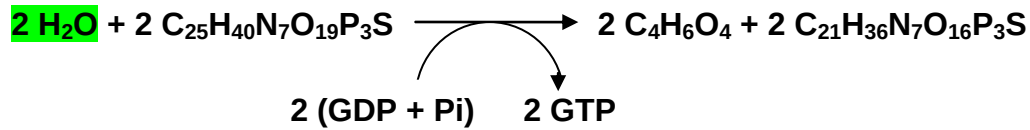
(Cette demi-équation fonctionne dans les deux sens mais dans le cas de la respiration cellulaire, nous ne nous intéresserons qu'à ce sens-là)

- L'équation-bilan de cette 6^{ème} étape du cycle de Krebs :

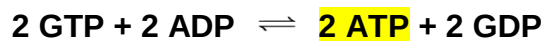


- Étape 7 : la division des deux molécules de succinyl-CoA

Les deux molécules de succinyl-CoA réagissent avec deux molécules d'eau et chacune est scindée en un CoA et en une molécule d'**acide succinique**. Il y a également une production d'énergie qui permet la synthèse de 2 **Guanosines Triphosphates (GTP)** (uniquement chez les animaux car chez les végétaux, il y a production de 2 ATP). La GTP assure un rôle similaire par rapport à l'ATP du fait qu'elle donne ses groupes phosphates et son hydrolyse produit de l'énergie nécessaire à une activité cellulaire. On a ainsi :



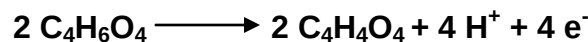
Par ailleurs, la GTP donne ensuite un groupe phosphate à un ADP pour former un ATP (il y a donc production de deux molécules d'ATP) :



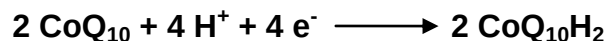
- Étape 8 : l'oxydation des deux molécules d'acide succinique

Les deux molécules d'acide succinique sont oxydées en réagissant avec deux coenzymes appelés **ubiquinones** (notées **CoQ₁₀** ou **FAD**) pour former 2 CoQ₁₀ réduites et donc notées **2 CoQ₁₀H₂** et deux molécules d'**acide fumarique**. On obtient :

- La demi-équation d'oxydation des deux molécules d'acide succinique :

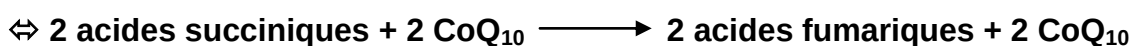
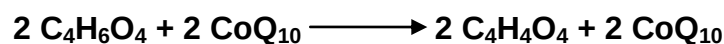


- La demi-équation de réduction des deux coenzymes CoQ₁₀ :



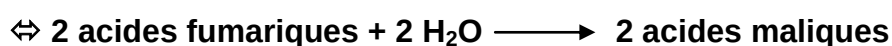
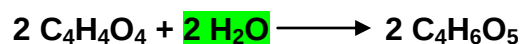
(Ces deux demi-équations fonctionnent dans les deux sens mais dans le cas de la respiration cellulaire, nous ne nous intéresserons qu'à ce sens-là)

- L'équation-bilan de cette 8^{ème} étape du cycle de Krebs :



- Étape 9 : l'hydratation des deux molécules d'acide fumarique

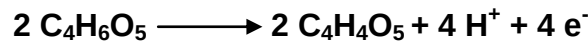
Les deux molécules d'acide fumarique vont être **hydratées**. Cette hydratation va former deux molécules d'acide malique. On a ainsi :



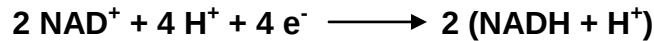
- **Étape 10 : l'oxydation des deux molécules d'acide malique**

Les deux molécules d'acide malique sont oxydées en réagissant avec 2 NAD⁺ pour former deux molécules d'**acide oxaloacétique** et 2 (NADH + H⁺). On obtient :

- La demi-équation d'oxydation des deux molécules d'acide malique :

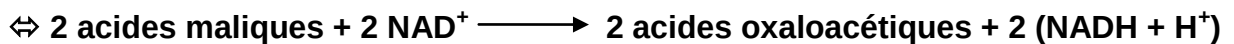
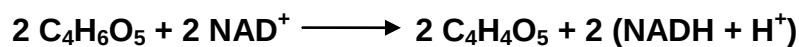


- La demi-équation de réduction des deux coenzymes CoQ₁₀ :



(Ces 2 demi-équations fonctionnent dans les deux sens mais dans le cas de la respiration cellulaire, nous ne nous intéresserons qu'à ce sens-là)

- L'équation-bilan de cette 10^{ème} étape du cycle de Krebs :



On constate que l'acide oxaloacétique, l'accepteur organique de l'acide citrique (au départ), est régénéré : **le cycle de Krebs est donc régénéré** lui aussi.

Légende :

⇔ signe correspondant à « équivaut à »

CO₂ molécules de dioxyde de carbone produites

H₂O molécules d'eau consommées

H₂O deux molécules d'eau considérée comme une seule et même molécule d'eau

ATP molécules d'ATP produites

On peut ainsi remarquer que, principalement (et pour une molécule de glucose consommée), six molécules de CO₂ et deux molécules d'ATP sont produites alors que six molécules d'eau sont consommées.

D'autre part, dix coenzymes réduits sont produits à l'issue du cycle de Krebs : il s'agit de 8 (NADH + H⁺) et de 2 CoQ₁₀H₂.

A ces 8 (NADH + H⁺) s'ajoutent les 2 (NADH + H⁺) produits lors de la glycolyse dans le hyaloplasme : on obtient donc un total de **10 (NADH + H⁺)** et **2 CoQ₁₀H₂** et donc de **12 coenzymes réduits**.

L'ÉQUATION-BILAN (SIMPLIFIÉE) DU CYCLE DE KREBS EST DONC :

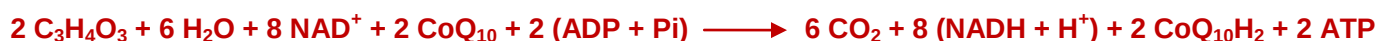
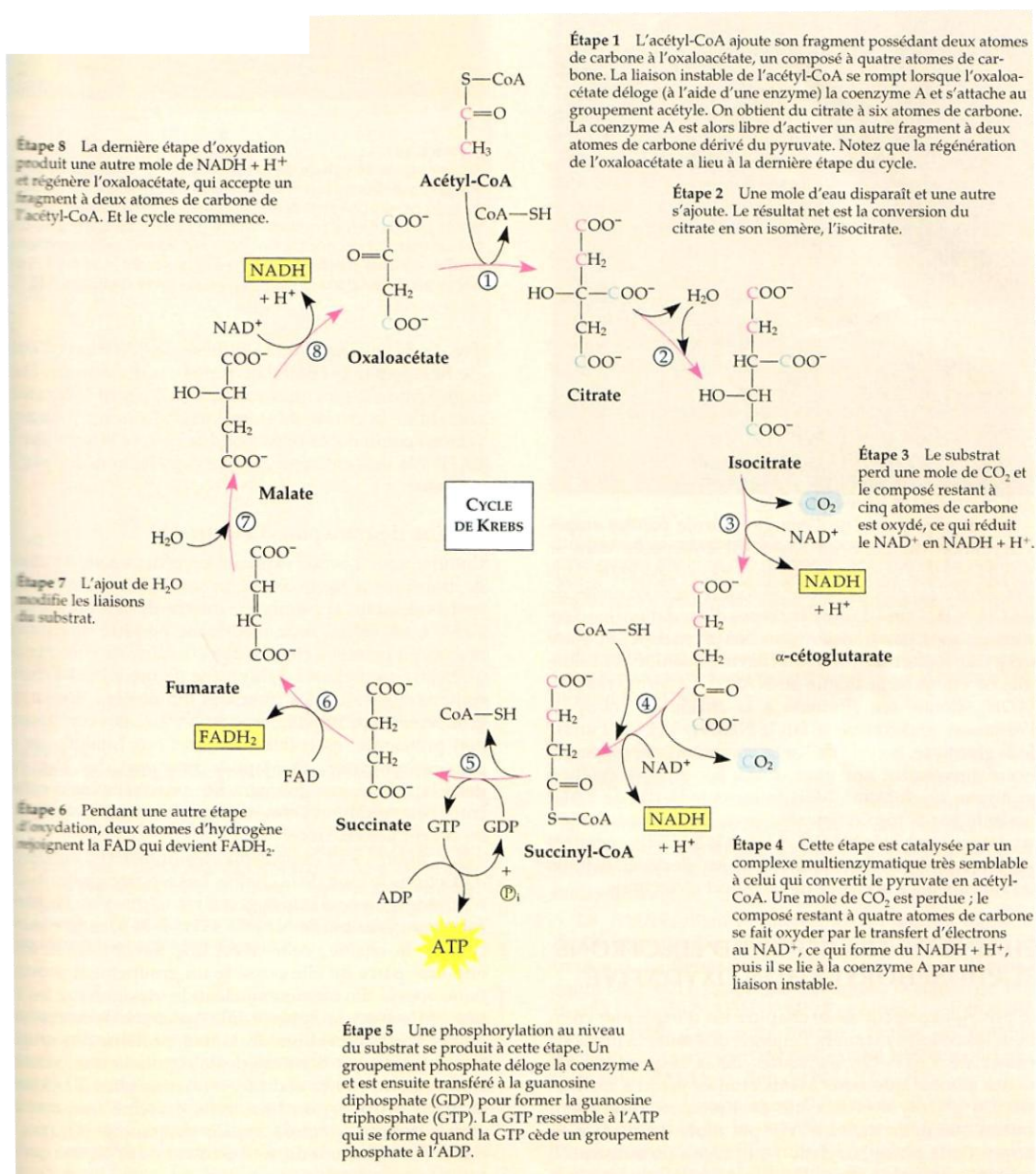


Schéma présentant les étapes du cycle de Krebs



SOURCES : Biologie, N.A. CAMPBELL, adaptation et révision scientifique de Richard Mathieu, éditions De Boeck Université (1995), ISBN DE BOECK : 2-8041-2084-8, ISBN ERPI : 2-7613-0653-8, p.183

2. Les supports

- Bibliographie :

- Breuil, Michel. Dictionnaire des Sciences de la Vie et de la Terre. Nathan, 1997, ISBN : 2-09-181176-9
- Campbell, N.A.. Biologie, adaptation et révision scientifique de Richard Mathieu. De Boeck Université, 1995, ISBN DE BOECK : 2-8041-2084-8, ISBN ERPI : 2-7613-0653-8
- Marieb, Elaine N.. Biologie Humaine, Anatomie et Physiologie, traduction de la 6^e édition américaine par France Boudreault, Annie Desbiens, Marie-Claude Désorcy, adaptation française par René Lachaine. De Boeck Université, 2000, ISBN ERPI : 2-7613-1 109-4, ISBN DBU : 2-8041-3 152-1
- Lacombe, Michel. Précis d'anatomie et de physiologie humaines, texte 26^e édition, préparation au Diplôme d'Etat d'Infirmières et aux professions paramédicales. Lamarre, 1989, ISBN : 2-85030-048-9
- Lacombe, Michel. Précis d'anatomie et de physiologie humaines, atlas 26^e édition, préparation au Diplôme d'Etat d'Infirmières et aux professions paramédicales. Lamarre, 1989, ISBN : 2-85030-048-9
- Lehoucq, Roland. Faire des sciences avec Star Wars. Le Béal', 2015, ISBN : 978-2-84344-740-2
- Rensberger, Boyce. Au cœur de la vie, au royaume de la cellule vivante. De Boeck Université, 1999, ISBN-10 : 2744500542, ISBN-13 : 978-2744500541
- Manuel SVT 1^{ère} S programme 2011. Bordas, 2011, ISBN : 978-2-04-732842-2
- Manuel SVT T^{erm} S enseignement de spécialité SVT programme 2012. Bordas, 2012, ISBN : 978-2-04-732930-6
- Manuel Physique 1^{ère} S programme 2001, Lois de Newton, Travail et énergie Électrodynamique, Lentilles et Miroirs. Nathan, 2001, ISBN : 2-09-172075-5
- Manuel Physique-chimie 1^{ère} S programme 2011, Observer > Comprendre > Agir. Hachette, 2011, ISBN : 978-2-01-135535-5

- Sitographie :

- Youtube. <https://www.youtube.com/watch?v=x2YQJsbbWNA> (explication de la force par Obi-Wan Kenobi (**en anglais**))
- Youtube. <https://www.youtube.com/watch?v=FoVpSPXGCvc> (définition des midichloriens par Qui-Gon Jinn (**en anglais**))
- Youtube. <https://www.youtube.com/watch?v=PqaiKmm8gsY> (affrontement entre l'Empereur Palpatine et Luke Skywalker (**en anglais**))
- Jean-Pascal, Harmonie du corps et de l'esprit. <http://www.corps-esprit.net/2015/04/croire-en-sa-force-interieure-par-maitre-yoda.html> (photographie du fond d'écran de l'épisode I sur le site internet)
- La cellule bactérienne. http://www.ecosociosystemes.fr/cellule_bacterienne.html
- Letanoux. Cycle de Krebs. <http://www.cycledekrebs.fr/>

- Selosse Marc-André, Joyard Jacques. *Symbiose et évolution : à l'origine de la cellule eucaryote*, *Encyclopédie de l'Environnement*, [en ligne ISSN 2555-0950]. <https://www.encyclopedie-environnement.org/vivant/symbiose-evolution-lorigine-de-cellule-eucaryote/>
- Prat Roger, Vonarx Véronique. *La théorie endosymbiotique*. <http://www.snv.jussieu.fr/bmedia/Chloroplaste/endosymbiose.htm>
- Riom, Jean-Michel. *La chimie.fr*. <https://www.lachimie.fr/solutions/oxydoreduction/table-potentiel-standard.php>