

Joël de Rosnay

# Les origines de la vie De l'atome à la cellule

ISBN 2.02.000216-7

(Extrait)

## L'AUTO-CONSERVATION

*La fonction principale de tous les organismes vivants est celle qui leur permet d'assurer leur propre existence. Pour cela, ils agissent en véritables « transformateurs d'énergie », branchés en permanence sur une source extérieure : le soleil. Pour faire ressortir l'ensemble des processus d'auto-conservation qui assurent l'extraction, l'écoulement et l'utilisation de l'énergie solaire dans le monde vivant, donnons une image, celle de l'économie globale d'un pays.*

*Comment la cellule parvient-elle à équilibrer son « budget énergétique » ?*

### ● Pourquoi la cellule vivante a-t-elle besoin d'énergie ?

*La loi inexorable de l'entropie*<sup>1</sup>

Tout être vivant, même le plus petit microbe, doit en permanence, pour se maintenir en vie, *transformer* de l'énergie et *utiliser* avec économie. Le terme d'auto-conservation ne signifie pas autre chose.

Comme on a pu facilement s'en rendre compte, en observant au chapitre précédent les photographies prises au microscope électronique, la cellule est une organisation extrêmement complexe. De même qu'une automobile exige un soin constant, des révisions régulières et des réparations, la cellule doit, elle aussi, maintenir en permanence son infrastructure contre la dégradation irréversible qu'exerce le temps. Or, s'il existe des mécaniciens pour s'occuper des voitures, la

1. Ce mot est expliqué dans le paragraphe qui suit.

cellule doit être son propre mécanicien. Il y va de sa vie. L'inactivité lui est interdite, car elle entraînerait irrémédiablement sa perte.

Quelle est donc cette loi inexorable qui veut que toutes les structures organisées soient guettées par la désorganisation et le désordre ?

Une analogie le fera mieux comprendre : la pièce où vit et travaille un célibataire semble avoir une tendance naturelle au désordre. Les livres et les papiers traînent par terre. Les vêtements ne sont pas à leur place dans les placards, le lit n'est pas fait, la couche de poussière épaissit sur les meubles et sur le sol. Or, les placards ne se rangent pas tout seuls..., chacun connaît l'énergie qu'il faut dépenser pour tout ranger, surtout si on a laissé passer trop de temps ! *Remettre de l'ordre coûte cher en énergie*. Plus un système est ordonné ou organisé, (comme la cellule), plus il lui faudra d'énergie pour *maintenir son organisation contre la tendance naturelle au désordre*. Cette énergie devra pénétrer continuellement dans le système, faute de quoi il ne tardera pas à se désagréger en petits morceaux.

Ainsi, la loi qui régit les échanges énergétiques, tend à dégrader toute structure ordonnée en la conduisant, étape par étape, à un niveau inférieur où toute différence d'énergie ou de forme, se trouvera annulée dans une universelle homogénéité.

Tandis que se poursuit ce nivellement irréversible, une grandeur physique s'accroît ; cette grandeur abstraite, les physiciens l'appellent l'*entropie*. Elle mesure le degré de « dégénérescence » ou d'« usure » de l'énergie, ainsi que le degré de désordre d'une structure organisée<sup>1</sup>.

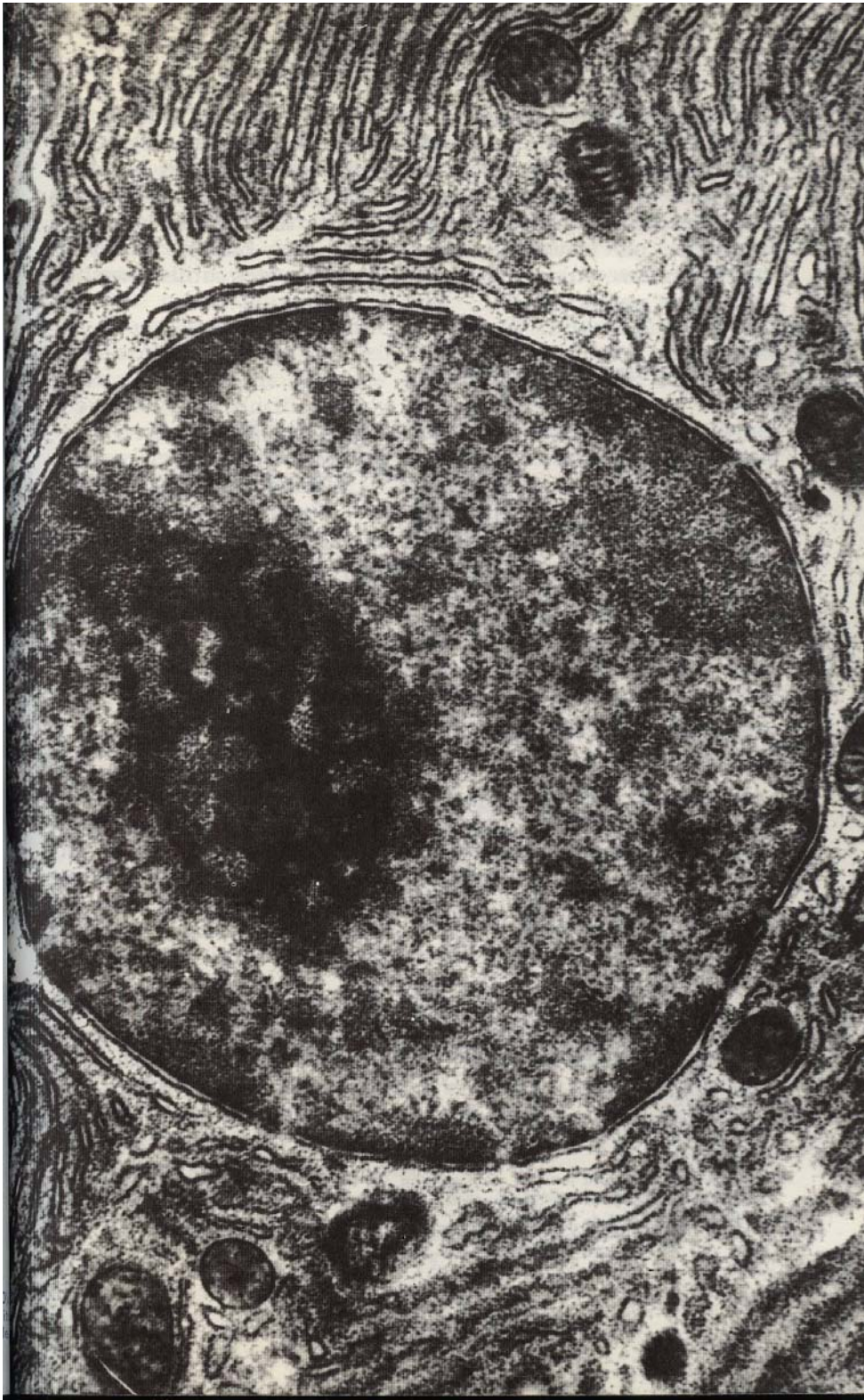
#### *La consommation d'énergie par la cellule*

Pour lutter contre les effets de l'entropie – énergie « usée » –, et éviter ce nivellement énergétique qui est la mort, la cellule a donc un besoin constant d'énergie « fraîche ». Cette énergie est continuellement empruntée à l'extérieur sous forme d'aliments ; c'est ce qui explique pourquoi tout être vivant – même le plus simple – est obligé de se nourrir.

La cellule a également besoin d'énergie pour accomplir

---

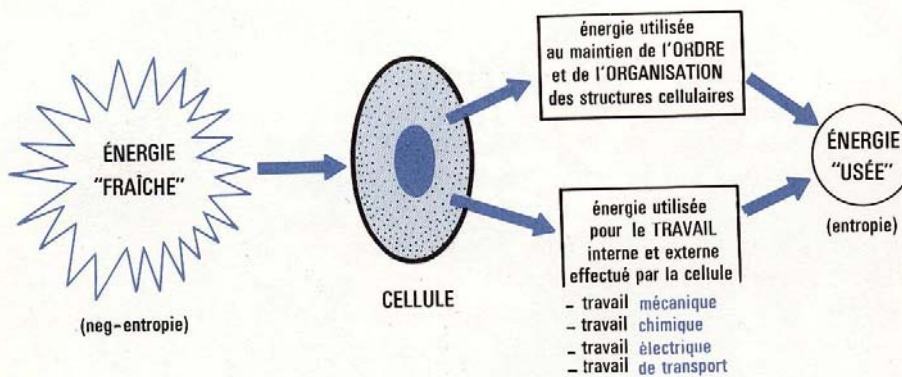
1. Cette loi fondamentale est exprimée par le *deuxième principe de la thermodynamique* (ou principe de Carnot) : un système isolé - c'est-à-dire n'échangeant ni matière ni énergie avec l'environnement - et éloigné de l'état d'équilibre, évolue de telle sorte que son entropie augmente. Nous verrons dans la deuxième partie que la vie est en apparence contradiction avec le deuxième principe.



un certain *travail*. Ainsi, quand elle se meut à l'aide de flagelles ou de cils, quand elle se contracte, elle effectue un travail *mécanique*. Au cours des synthèses chimiques internes, dans la conduction de faibles courants électriques, ou dans le transport de substances à travers sa membrane, la cellule effectue un travail *chimique*, *électrique*, ou de *transport*.

Résumons en un schéma, les différentes utilisations de l'énergie par la cellule.

#### L'UTILISATION D'ÉNERGIE PAR LA CELLULE



#### ● D'où vient l'énergie qui actionne la machine cellulaire ?

##### *Pas de vie sans le soleil*

A plus ou moins long terme, l'énergie chimique contenue dans les aliments, absorbés ou fabriqués par les êtres vivants provient en définitive du soleil. Les aliments sont en quelque sorte de l'énergie solaire en conserve. Sans le soleil, toute vie sur la terre, comme nous le verrons plus loin, aurait été impossible. Mais sous quelle forme cette énergie parvient-elle jusqu'à la terre ?

Le soleil émet en permanence, dans tout l'espace environnant, un rayonnement que nous appelons *ultraviolet*, *lumière*, *chaleur*, ou *ondes radios*, mais qui est en réalité de nature unique : c'est le *rayonnement électromagnétique*. Il se propage dans l'espace vide à une très grande vitesse<sup>1</sup> et

1. La vitesse de la lumière est d'environ 300 000 km par seconde dans le vide. La distance parcourue en une année par la lumière (une année de lumière) représente environ 10 000 000 000 000 de km.

contient, suivant sa longueur d'onde et sa fréquence, *une certaine quantité d'énergie utilisable*. Cette énergie se trouve sous forme de petits « paquets » que l'on appelle des *photons*. Quand nous nous trouvons devant une ampoule électrique, un feu ou un émetteur de radio, nous sommes en permanence bombardés par des myriades de photons. Plus la longueur d'onde du rayonnement est *courte*, plus la quantité d'énergie portée par le photon est *grande*.

Nous possédons maintenant un fil conducteur : le flux d'énergie émis par le soleil. Il atteint notre terre sous forme de photons dont l'énergie utilisable décroît de l'ultraviolet aux rayons calorifiques.

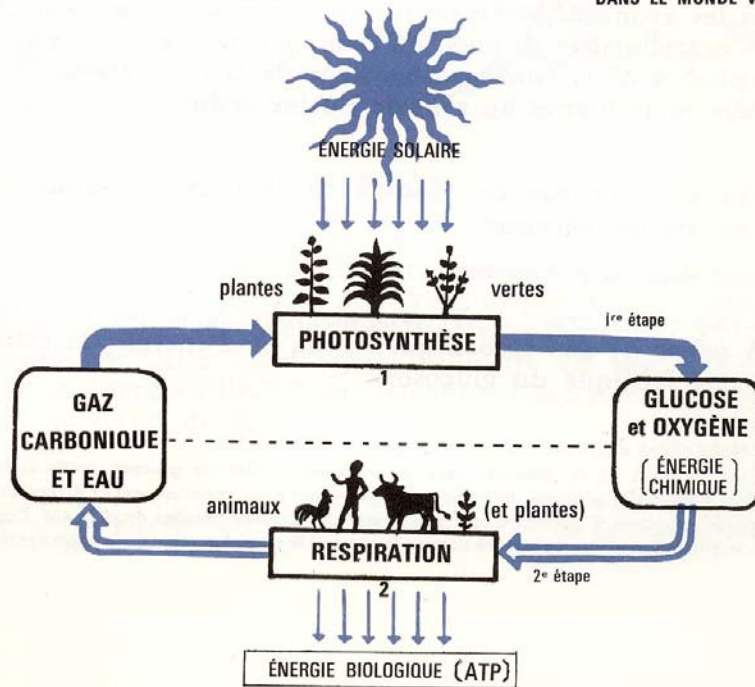
Avant de voir comment cette énergie brute est transformée pour actionner la machine cellulaire, considérons le schéma général qui conditionne l'« économie » de l'énergie solaire par le monde vivant.

#### *Du soleil à la cellule*

Ce schéma général a la forme d'un circuit bouclé sur lui-même, dans lequel animaux et végétaux sont tributaires les uns des autres. Ce circuit *comprend deux étapes essentielles*.

● *La première étape est la transformation de l'énergie lumineuse du soleil en énergie chimique*. Autrement dit, l'énergie

LA CIRCULATION DE L'ÉNERGIE  
DANS LE MONDE VIVANT



électromagnétique des photons est mise en réserve dans les liaisons chimiques d'un composé bien connu : le *glucose*. Cette opération, appelée PHOTOSYNTHÈSE, libère dans l'atmosphère de l'*oxygène gazeux* (1). Elle s'accomplit généralement dans les cellules spécialisées des plantes vertes, mais déjà, nous l'avons vu, des micro-organismes primitifs comme l'algue *Chlamydomonas* la réalisaient.

● *Au cours de la deuxième étape*, le glucose servant cette fois d'aliment, est « brûlé » en présence d'oxygène, dans les cellules des animaux et des plantes (2). Cette combustion « froide », appelée RESPIRATION, fournit de l'énergie directement utilisable par la cellule sous forme de « petite monnaie ». Cette monnaie circulante est le combustible interne utilisé par tous les êtres vivants sans exception. Le nom de cette molécule très importante est l'ATP<sup>1</sup>. Les produits de la respiration sont le *gaz carbonique* et l'*eau*.

On comprend maintenant pourquoi animaux et végétaux ne peuvent vivre l'un sans l'autre : la plante fournit le glucose et l'oxygène – agents essentiels de la respiration –, cependant que l'animal lui renvoie le gaz carbonique, source de carbone minéral, à partir duquel la plante verte fabrique les composés organiques dont elle a besoin.

Photosynthèse et respiration se font chacune dans un organe bien déterminé de la cellule. Ces deux organes fondamentaux dont les structures se ressemblent à bien des égards, nous les avons déjà rencontrés en observant l'anatomie des êtres unicellulaires. Il s'agit du *chloroplaste*, siège de la photosynthèse et de la *mitochondrie*, siège de la respiration. Deux ateliers moléculaires au sein de l'usine cellulaire.

## ● La transformation de l'énergie du rayonnement solaire en énergie chimique

### Première étape : la photosynthèse

*Les matériaux bruts et les produits finis de la photosynthèse.*

A partir de gaz carbonique, d'eau et d'énergie, la cellule végétale fabrique du glucose<sup>2</sup>.

1. Nous allons expliciter bientôt ces initiales.

2. Les produits de la photosynthèse ne sont pas limités au glucose, mais incluent d'autres sucres, des graisses, des acides aminés (dont nous reparlerons) et divers autres composés fabriqués à partir de matières minérales azotées puisées dans le sol. Cependant, le glucose peut être considéré comme le produit le plus important de la photosynthèse.

Faisons connaissance avec ces importantes molécules, (voir la réaction ci-dessous).

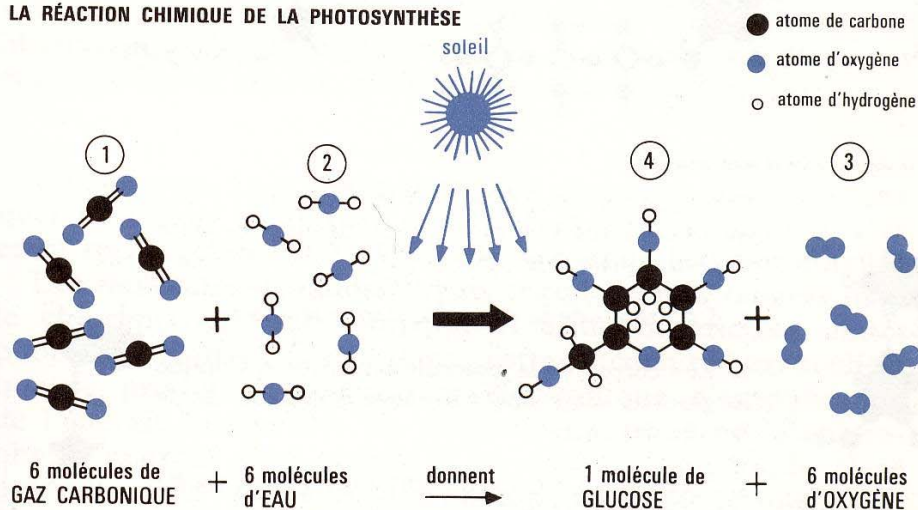
Le gaz carbonique, (1) matériau de départ de la photosynthèse, est une molécule contenant un seul atome de carbone. C'est l'élément de construction qui sert à la cellule pour fabriquer – comme par un jeu de Meccano chimique – des composés organiques complexes à plusieurs atomes de carbone.

L'eau (2) est la source d'électrons (représentant en quelque sorte les « boulons » qui permettent de fixer entre elles les pièces de ce Meccano), ainsi que la source d'oxygène gazeux (3).

Le glucose, (4) produit de la réaction, est une molécule plus complexe dont le squelette est constitué par six atomes de carbone.

Voici la réaction de base de la photosynthèse.

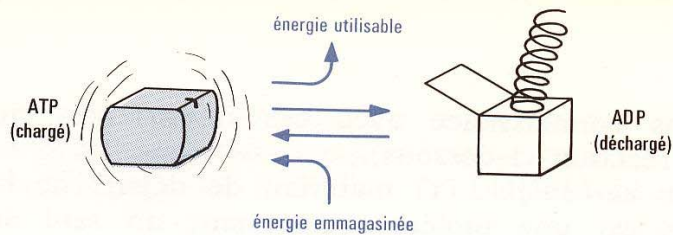
#### LA RÉACTION CHIMIQUE DE LA PHOTOSYNTÈSE



Le glucose sera toujours représenté sous sa forme cyclique

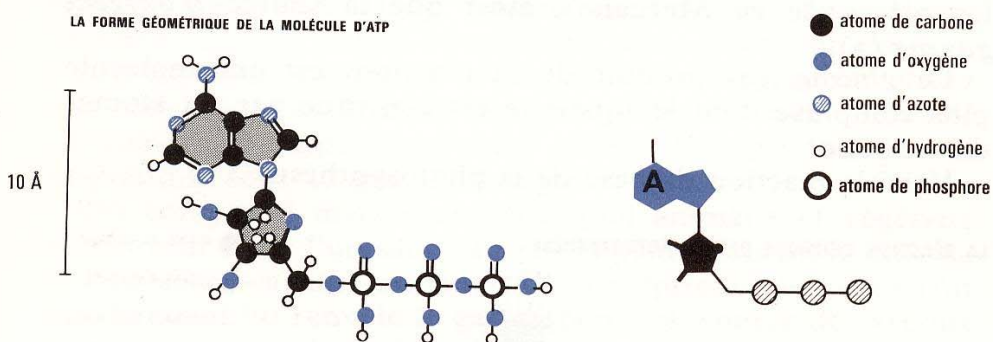
D'autre part, à l'aide de cette même énergie solaire et suivant un processus dont nous verrons plus loin les grandes lignes, la cellule végétale va « recharger ses batteries ». L'agent essentiel de cette « recharge » cellulaire est une molécule riche en énergie : l'ATP ou *adénosine triphosphate*, combustible universel de la vie <sup>1</sup>.

1. Le glucose et l'ATP sont deux molécules dont il sera souvent question dans ce livre. Il est important, pour bien comprendre la deuxième partie, de regarder attentivement leur structure (surtout celle de l'ATP).

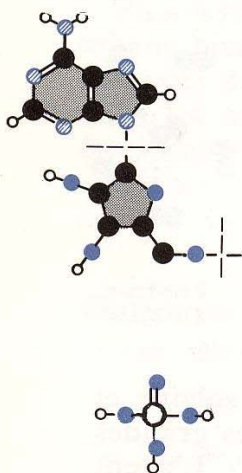


L'ATP peut être comparé à un ressort comprimé, capable de céder très rapidement, l'énergie qu'il contient en se détendant d'un seul coup. Le ressort comprimé c'est l'ATP molécule « chargée » ; tandis que le ressort détendu est l'ADP, molécule « déchargée ». Les initiales ATP et ADP renseignent sur la structure chimique de la molécule et indiquent où l'énergie est mise en réserve. C'est ce que montre l'ensemble des schémas suivants.

#### LA FORME GÉOMÉTRIQUE DE LA MOLÉCULE D'ATP

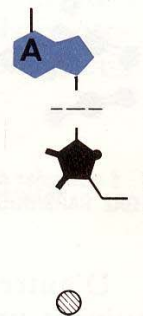


#### LA MOLÉCULE D'ATP EN PIÈCES DÉTACHÉES<sup>1</sup>



Comme nous l'avons fait pour les virus (qui ne sont qu'environ 100 fois plus longs), démontons cette molécule pièce par pièce.

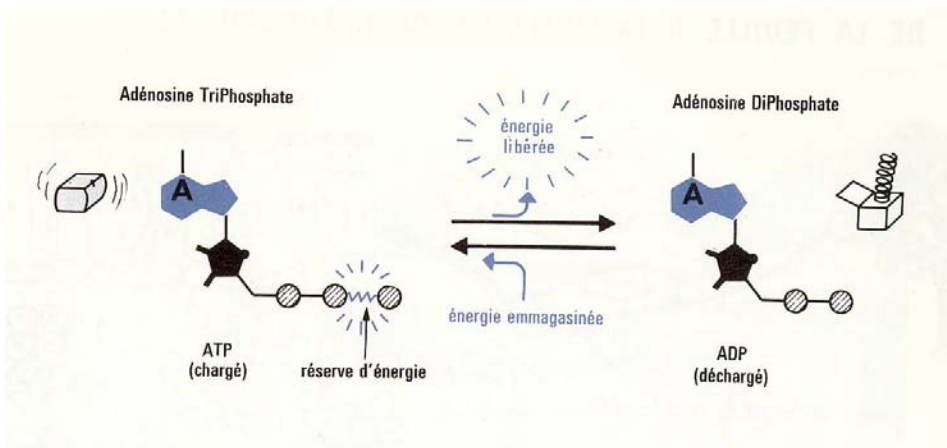
1. La « tête » de la molécule s'appelle *adénine*.
2. Le « corps » de la molécule est le *ribose*. Comme le glucose, c'est une substance chimique de la famille des sucres.
3. « Tête » et « corps » forment une nouvelle molécule appelée *adénosine*.
4. Enfin, la « queue », est constituée par la liaison de trois molécules d'*acide phosphorique* (triphosphate).



C'est dans les liaisons qui réunissent les trois groupes phosphates - formant la « queue » de la molécule - que se trouve emmagasinée l'énergie. La rupture de la liaison terminale libère une importante quantité d'énergie, utilisée par toutes les cellules en cas de besoin immédiat. C'est ce qu'indique le schéma suivant.

<sup>1</sup> Dans ce schéma et dans ceux qui suivront, les atomes d'hydrogène ne sont pas toujours représentés, de manière à éviter de surcharger la figure.





### Où se fait la photosynthèse ?

Le catalyseur essentiel de la photosynthèse est un pigment vert : la molécule de *chlorophylle*. Pour mieux situer la chlorophylle dans l'atelier moléculaire qu'est le chloroplaste, et pour mieux situer à son tour le chloroplaste dans la cellule végétale, partons de ce qui est directement accessible à notre observation. Un arbre par exemple. Et descendons, étage par étage, jusqu'au niveau moléculaire (voir figure p. 54).

### Comment se fait la photosynthèse ?

Il reste maintenant à répondre aux questions suivantes : par quel processus le glucose est-il fabriqué ? Comment l'ADP est-il rechargé en ATP ? Quel est le rôle de la chlorophylle ?

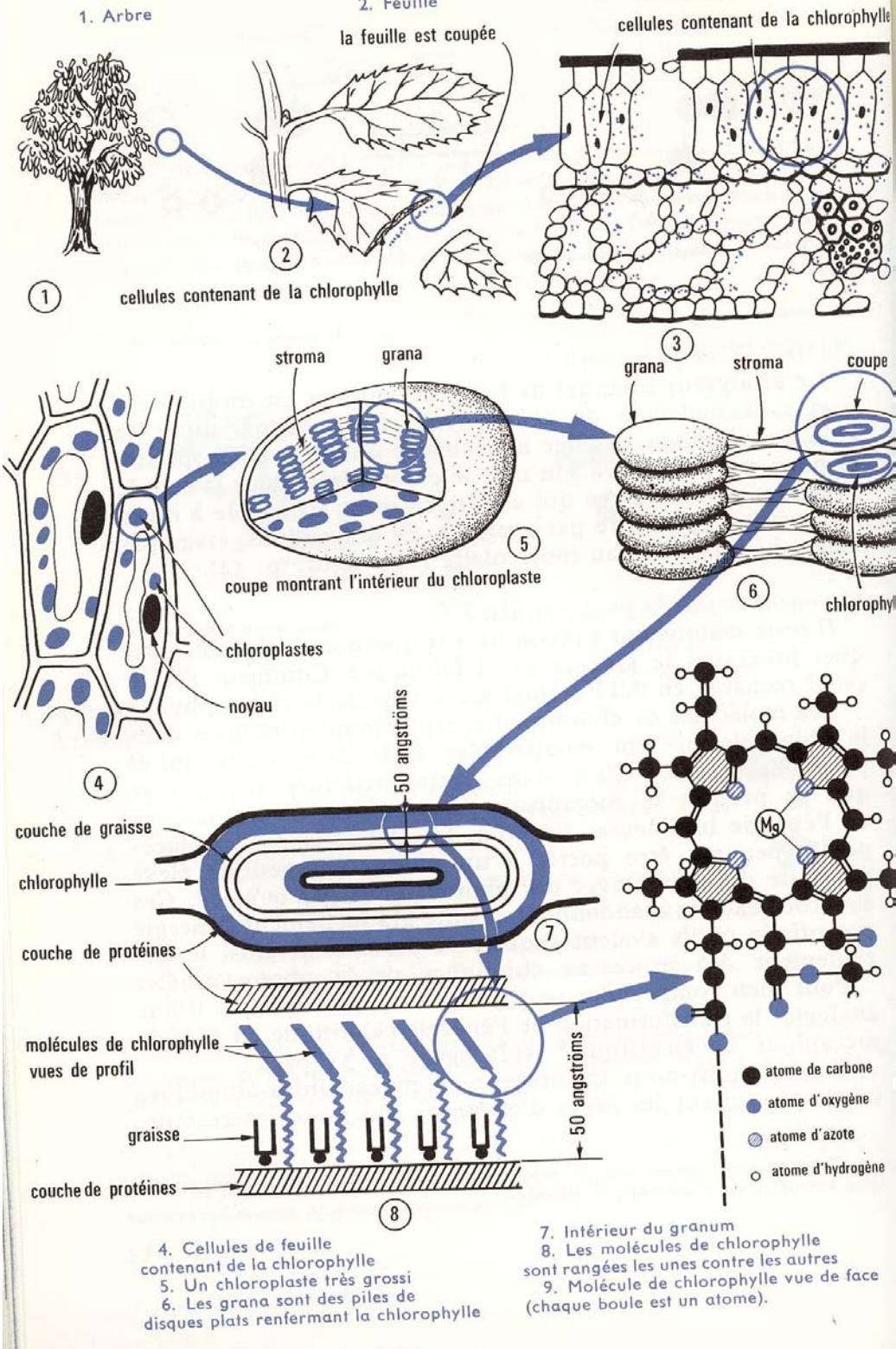
Les molécules de chlorophylle, régulièrement rangées dans le chloroplaste, sont comparables à de minuscules unités photo-électriques. C'est dans cette structure particulière que se produit le mécanisme électronique d'amplification de l'énergie lumineuse. En effet, les électrons de la chlorophylle peuvent être portés à un niveau énergétique élevé par suite d'un choc avec des photons émis par le soleil. Ces électrons excités abandonnent ensuite graduellement l'énergie potentielle qu'ils avaient acquise et permettent ainsi le déroulement des processus chimiques de la photosynthèse.

Pour bien comprendre ce phénomène, servons-nous d'une analogie : la transformation de l'énergie calorifique en énergie mécanique ou électrique<sup>1</sup> (voir figure p. 55 bas).

Transportons-nous maintenant au niveau infra-atomique, où se produisent les sauts d'électrons qui nous intéressent.

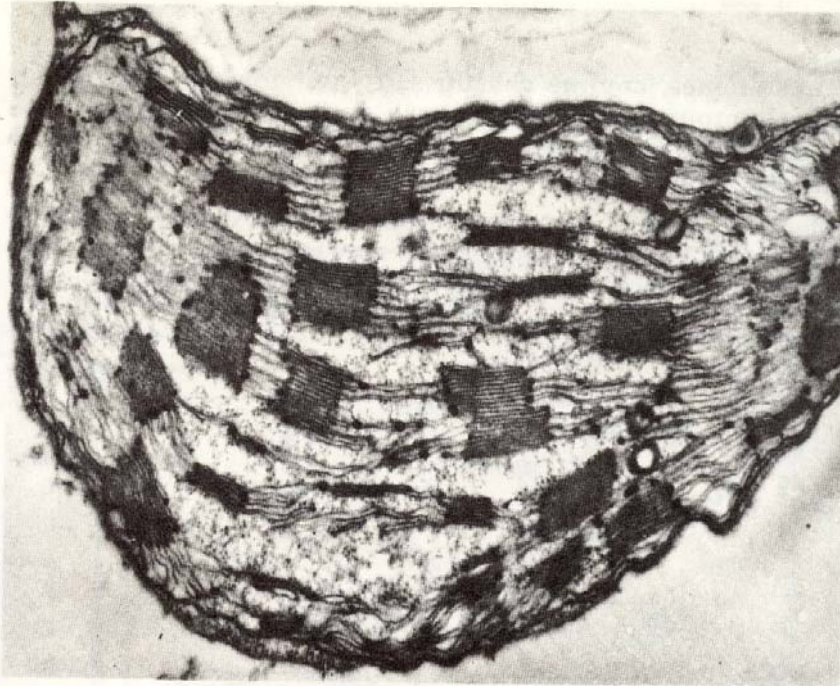
1. Cette analogie, comme nous le verrons par la suite, se rapporte à l'ensemble du cycle énergétique photosynthèse et respiration.

# DE LA FEUILLE A LA MOLECULE DE CHLOROPHYLLE

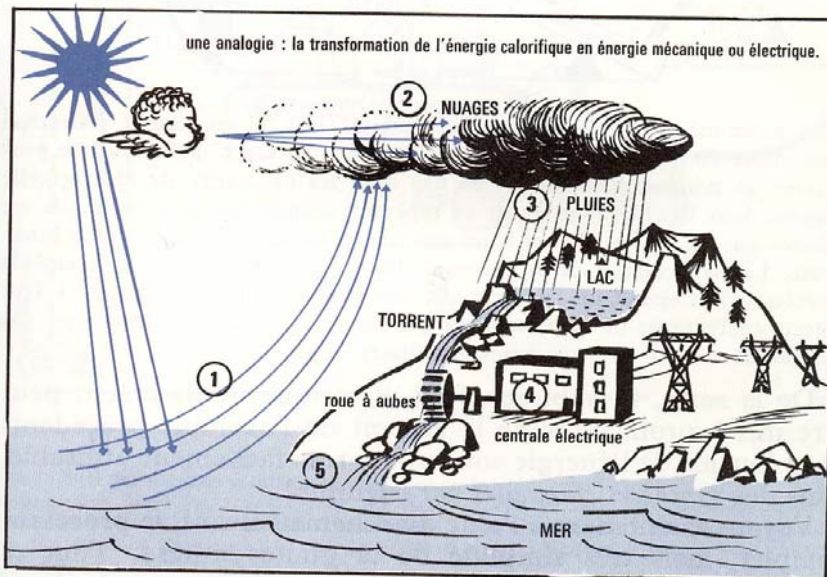


4. Cellules de feuille contenant de la chlorophylle  
 5. Un chloroplaste très gros  
 6. Les grana sont des piles de disques plats renfermant la chlorophylle

7. Intérieur du granum  
 8. Les molécules de chlorophylle sont rangées les unes contre les autres  
 9. Molécule de chlorophylle vue de face (chaque boule est un atome).



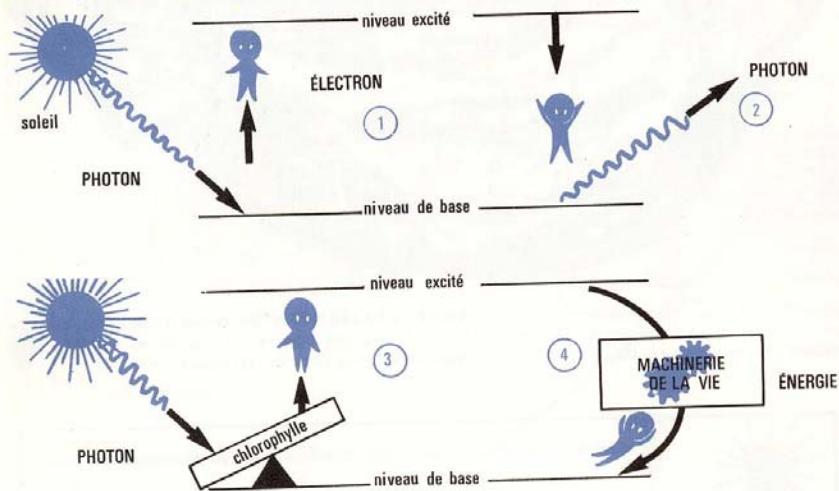
Chloroplaste vu au microscope électronique. Chaque série de stries parallèles correspond à des piles de disques étroitement serrés les uns contre les autres et contenant la chlorophylle (grana). Ils sont reliés par des stries plus claires (stroma).



Sous l'action de la chaleur du rayonnement solaire, l'eau des mers s'évapore pour former des nuages (1). Les molécules d'eau des nuages se trouvent à un niveau énergétique plus élevé que celles qui restent à la surface de la mer : elles représentent de l'énergie potentielle (2). Les nuages sont poussés par le vent et l'eau retombe en pluie sur les montagnes (3). Les lacs d'altitude sont des réservoirs d'énergie. Les torrents peuvent servir à faire tourner une roue (énergie mécanique). Cette roue peut entraîner un générateur électrique (4). Les cours d'eau se jettent dans la mer : les molécules d'eau sont retournées à leur niveau de départ après avoir abandonné en route leur énergie (5).

Les atomes, comme chacun sait, sont formés d'un noyau central autour duquel « gravitent » des particules électrisées : les électrons. Ces électrons occupent des orbites bien déterminées, correspondant à différents niveaux d'énergie.

Que va-t-il se passer si un électron reçoit un surplus d'énergie sous forme de photons de lumière ou de chaleur ? Il saute brusquement sur une orbite plus éloignée du noyau, orbite correspondant à un niveau énergétique plus élevé (1). Mais, au bout d'un temps très court, cet électron retombe à son niveau énergétique de départ en restituant l'énergie qu'il avait reçue sous la forme d'un autre photon (2).

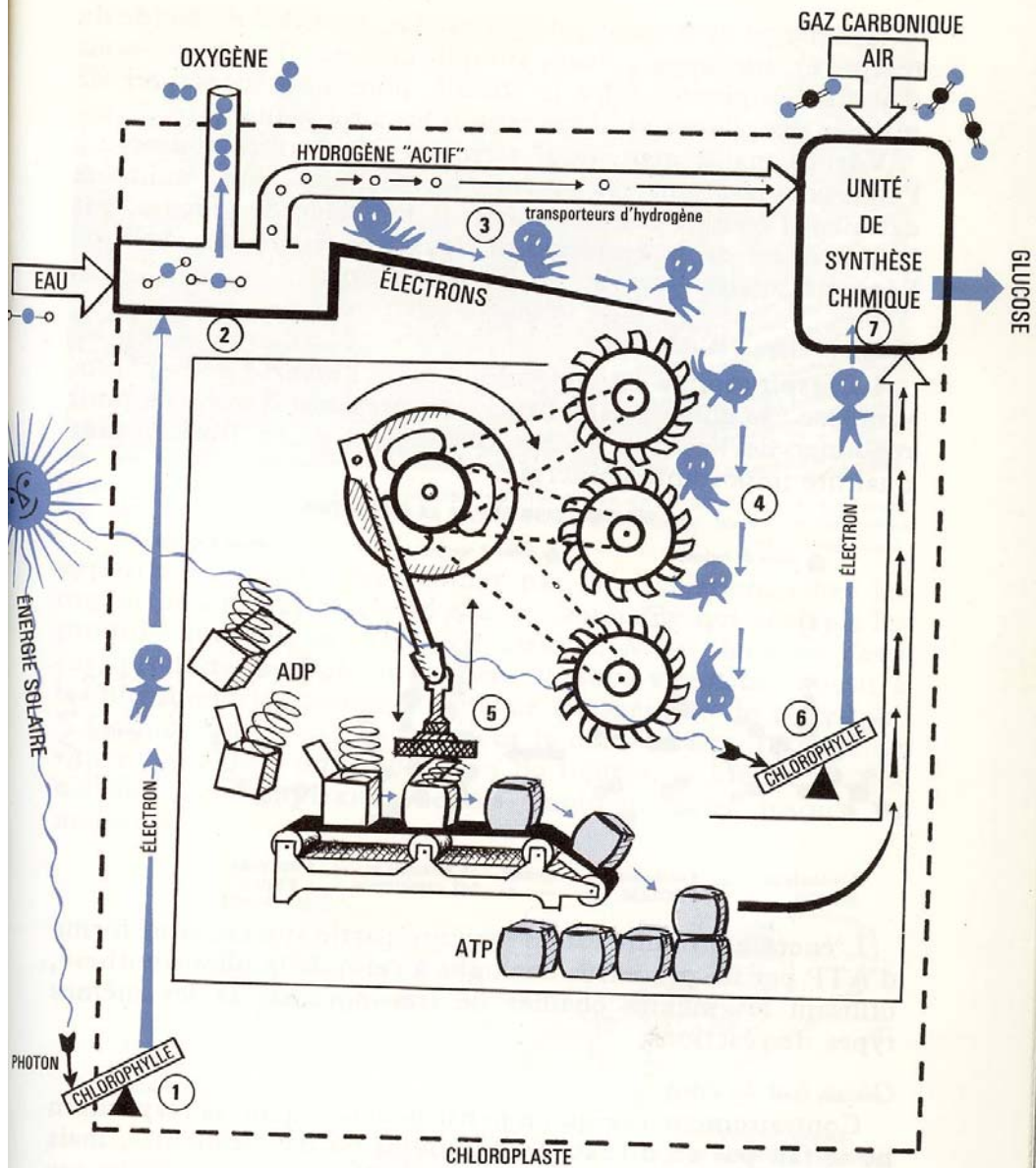


Le phénomène « vie » s'est intercalé entre (1) et (2) en forçant l'électron à retomber dans sa propre machinerie. En effet, ces sauts d'électrons se produisent un nombre incalculable de fois dans les molécules de chlorophylle rangées dans le chloroplaste. Ils se répètent chaque fois que la feuille est éclairée par les rayons du soleil ou par n'importe quelle autre source lumineuse. La particularité de la chlorophylle est de faciliter ces changements d'orbite (3). Cependant l'énergie des électrons excités retournant à leur niveau énergétique de départ serait perdue si ces électrons n'étaient pas « canalisés » dans des structures adéquates (4).

De la sorte, le faible courant électrique qu'ils créent peut être mis à profit (comme le torrent de l'exemple précédent) pour fournir de l'énergie sous une forme facilement utilisable, dans des *synthèses chimiques* par exemple.

Voyons maintenant à l'aide du schéma suivant, le processus complet, mais très simplifié de la photosynthèse. Tout se passe à l'intérieur du chloroplaste figuré ici par la ligne pointillée entourant le dessin.

## LE CHLOROPLASTE : USINE À PHOTOSYNTÈSE.



Sous l'effet des photons solaires, les électrons de la chlorophylle sont portés à un niveau énergétique élevé (1). L'énergie de ces électrons excités sert, probablement, dans un premier temps, à couper en deux la molécule d'eau (2). Résultat : de l'oxygène gazeux se dégage dans l'atmosphère. Des électrons et de l'hydrogène « actif » sont collectés par des transporteurs chimiques (3). Le flux des électrons descendant vers un niveau énergétique plus bas, abandonne graduellement son énergie à une chaîne de transporteurs d'électrons (figurés par les roues à aube) (4). Cette énergie sert à actionner la machine à recharger l'ADP et ATP (par l'intermédiaire du piston et du tapis roulant, évidemment imaginaires) (5). Enfin, les électrons excités à nouveau – probablement par l'intermédiaire d'une autre molécule de chlorophylle (6) – sont utilisés avec les hydrogènes « actifs » et de l'ATP, dans l'unité de synthèse chimique (7). Ils servent à attacher les éléments de construction provenant du gaz carbonique pour former la molécule de glucose.

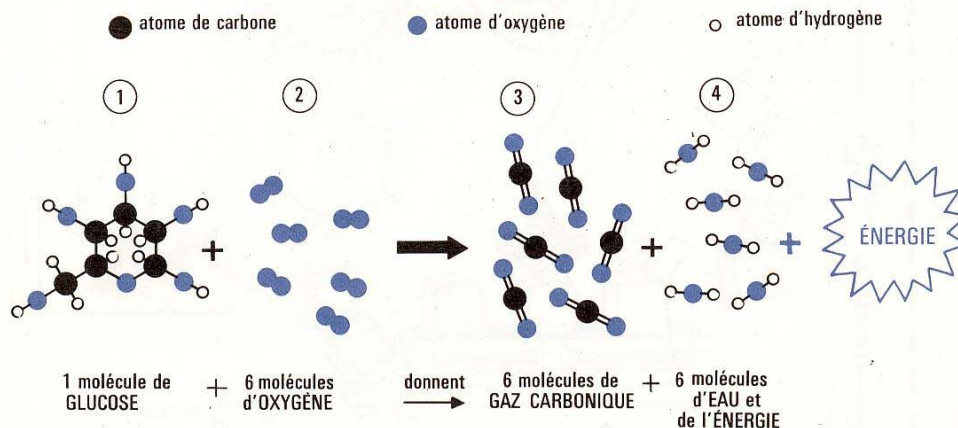
Comme on peut aisément le constater, tout ceci demande du temps et un appareillage compliqué. Aussi laissons-nous d'abord les plantes faire le travail, pour nous contenter de manger ces plantes ou l'animal qui les aura mangées!

Voyons maintenant, pour terminer ce chapitre consacré à l'auto-conservation, comment les cellules des animaux extraient l'énergie contenue dans la molécule de glucose, par le processus de la respiration, deuxième étape du cycle de l'énergie solaire à travers le monde vivant.

### Deuxième étape : la respiration

La respiration, c'est en quelque sorte l'inverse de la photosynthèse : le glucose est « brûlé » en présence d'oxygène pour redonner de l'eau et du gaz carbonique et en libérant une quantité importante d'énergie.

#### LA RÉACTION CHIMIQUE DE LA RESPIRATION

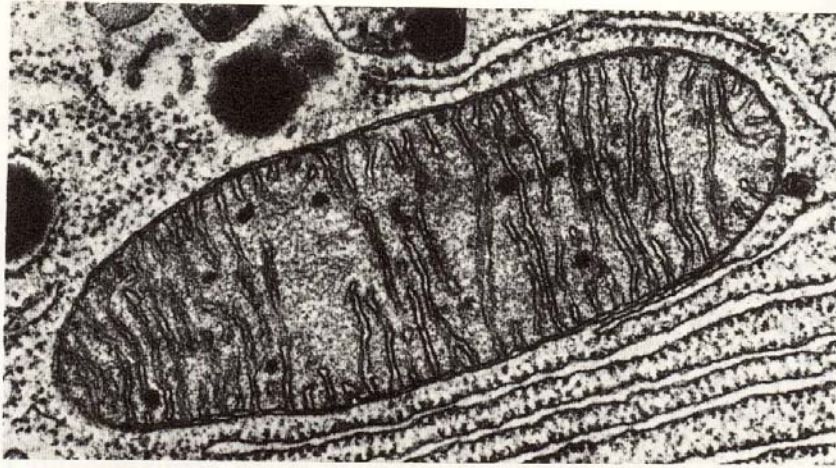


L'énergie produite est en majeure partie stockée sous forme d'ATP par un processus analogue à celui de la photosynthèse, utilisant les mêmes chaînes de transporteurs et les mêmes types de réactions.

### Où se fait la respiration ?

Contrairement à ce qu'on pense généralement, la respiration ne se fait pas au niveau des poumons ou des branchies, mais au niveau cellulaire et même, nous allons le voir, *au niveau moléculaire*, dans des organites spécialisés : les mitochondries. Chez les animaux supérieurs, les aliments <sup>1</sup> et l'oxygène sont

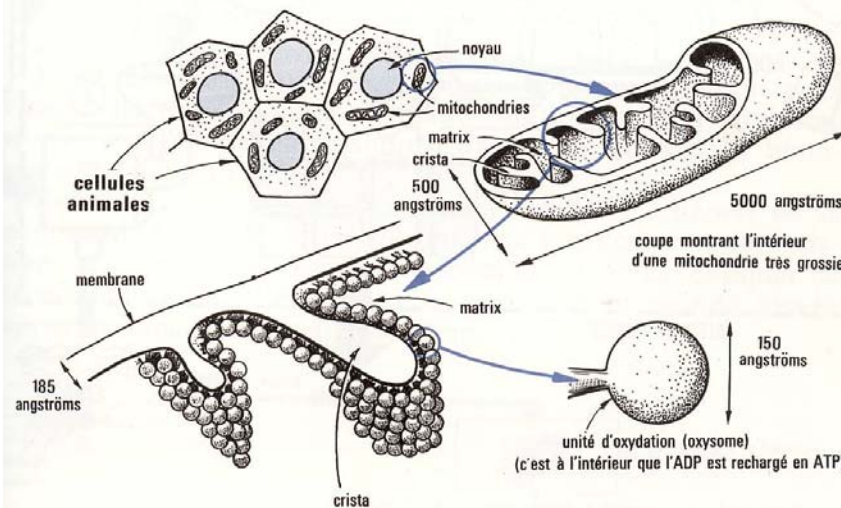
1. Les aliments dont se nourrissent les animaux subissent une phase préparatoire indépendante de la respiration : la digestion. Les grosses molécules (protéines, graisses, sucres) sont coupées par des protéines digestives spéciales : les *enzymes*.

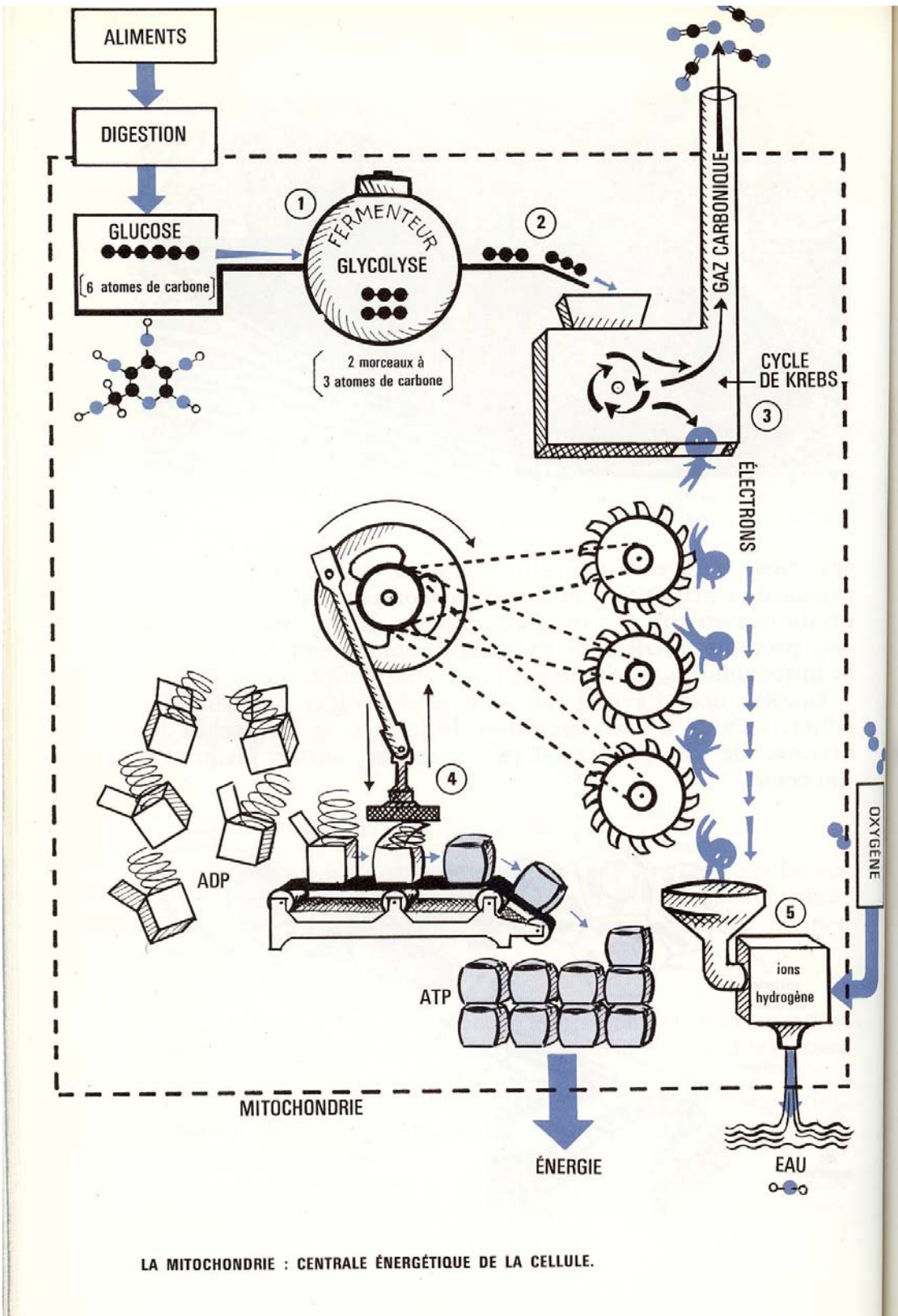


Cette mitochondrie, très grossie, appartient au même type de cellule que celle qui figure à la page 47. On voit les replis formés par la membrane interne, les *cristae* (ou crêtes mitochondriales).

apportés au niveau des cellules par la circulation. Chez les organismes primitifs, c'est l'eau environnante qui véhicule les produits nutritifs et l'oxygène dissous. Mais, dans les deux cas, produits nutritifs et oxygène dissous viennent aboutir à la mitochondrie, véritable centrale énergétique de la cellule.

Comme nous l'avons fait pour le chloroplaste, tâchons de situer, à l'aide d'une succession de figures, la hiérarchie des niveaux de complexité, depuis l'animal entier jusqu'à la molécule.





LA MITOCHONDRIE : CENTRALE ÉNERGÉTIQUE DE LA CELLULE.



### Comment se fait la respiration ?

L'un des principaux produits de la digestion est le glucose. C'est son oxydation que nous allons considérer comme processus typique.

La triple fonction de la mitochondrie est : 1 - arracher les électrons appartenant aux liaisons qui unissent les atomes de carbone, d'hydrogène, et d'oxygène dans la molécule de glucose (c'est-à-dire oxyder cette molécule) ; 2 - canaliser ce flot d'électrons d'étape en étape jusqu'au niveau énergétique de base : l'eau ; 3 - utiliser l'énergie ainsi produite pour recharger l'ADP en ATP.

La première fonction est assurée par la *matrix* à l'intérieur de la mitochondrie, tandis que la seconde et la troisième fonction s'accomplissent dans la *membrane*.

Suivons sur la figure ci-contre les différentes étapes de ce processus.

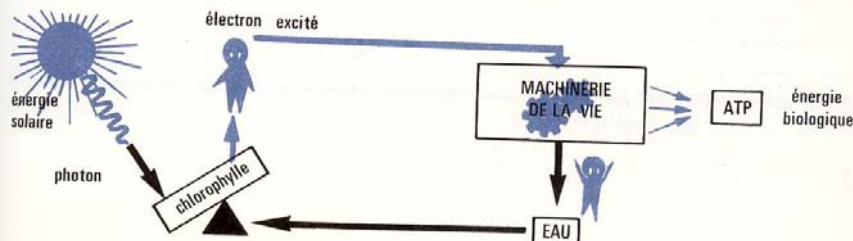
Le glucose provenant de la digestion subit une préparation en 11 étapes, qui se produit en l'absence d'oxygène. C'est une réaction analogue à une fermentation et appelée *glycolyse* (1). A la fin de ce processus qui libère une faible quantité d'énergie, la molécule de glucose à 6 atomes de carbone, est coupée en deux morceaux à 3 atomes de carbone (2). Ces tronçons sont introduits dans une « machine à broyer les molécules », véritable « moulin » énergétique de la vie : le cycle de Krebs<sup>1</sup> (3). Il en sort du gaz carbonique, - résidu à un atome de carbone - et des électrons, riches en énergie. Comme pour la photosynthèse, mais à une plus grande échelle, l'énergie de ces électrons est utilisée pour recharger l'ADP en ATP (4). (55 % de l'énergie initialement contenue dans la molécule de glucose se trouvent maintenant renfermés dans l'ATP). En fin de parcours les électrons se combinent à l'oxygène, qui, à son tour, attire des ions hydrogène (c'est-à-dire des atomes d'hydrogène totalement dépouillés de leurs électrons) pour redonner de l'eau (5). Le cycle est bouclé.

1. Du nom de Sir Hans Krebs de l'Université de Manchester, Prix Nobel 1953 de médecine et de physiologie, qui l'a découvert.

### Un petit courant électrique alimenté par le soleil

L'énergie portée par un rayon de lumière, issu d'un astre éloigné de plus de cent cinquante millions de kilomètres se trouve maintenant emprisonnée dans le petit explosif biologique qu'est l'ATP.

En rapprochant et en fusionnant les deux schémas de la p. 57 et de la p. 60 ; et en éliminant la synthèse et la combustion du glucose, processus intermédiaire, le cycle complet de la circulation de l'énergie à travers tout le monde vivant apparaît dans sa merveilleuse simplicité :



Des électrons, portés à un haut niveau énergétique par des photons solaires retombent à leur niveau initial abandonnant graduellement à travers le système vivant l'énergie qui fait « tourner » la machinerie de la vie. La vie est donc conduite essentiellement par des électrons. Or un électron qui se promène est, comme nous l'avons vu, un petit courant. Ce qui entretient et mène la vie est donc, comme le dit de manière poétique le grand biochimiste A. Szent Györgyi, « un petit courant électrique alimenté par le soleil! ».