

# La notion d'énergie : un peu d'histoire !

DOSSIER DE VULGARISATION

2002

par Jean Olbregts



**INFORSCIENCES**  
UNIVERSITÉ LIBRE DE BRUXELLES

FACULTÉ DES SCIENCES

Campus de la Plaine, CP260 - Boulevard du Triomphe - B-1050  
Bruxelles

T 02 650 50 24 F 02 650 54 02 M [inforSCIENCES@ulb.ac.be](mailto:inforSCIENCES@ulb.ac.be)

W [www.ulb.ac.be/inforSCIENCES](http://www.ulb.ac.be/inforSCIENCES)

# Energie ?

## Vous avez dit « énergie » ??

---

En cette année 2002, le Printemps des Sciences a donc pour thème l'énergie sous toutes ses formes. Que l'on évoque notre fatigue en la qualifiant de « manque d'énergie », que l'on envisage l'achat d'une nouvelle cuisinière - alimentée au gaz ou à l'électricité- ou que l'on écoute un débat consacré aux problèmes écologiques engendrés par les émissions de gaz à effet de serre, on n'échappe pas à ce terme générique. Mais que recouvre-t-il exactement ? Est-il toujours utilisé à bon escient ?

Combien de recherches n'ont-elles pas pour but d'optimiser le rendement énergétique d'un système, en tenant compte de divers facteurs tels que le coût de la mise en œuvre, la pollution et les dangers qui en résultent ? Les organismes vivants ne sont-ils pas eux-mêmes équipés de systèmes leur permettant d'utiliser au mieux l'énergie ? Combien d'échecs n'ont-ils pas été liés à la volonté de l'Humain de créer de l'énergie à partir de rien, de braver les principes de la thermodynamique ? Cette quête du mouvement perpétuel en a épuisé plus d'un?

L'énergie se conserve. Soit. Mais surtout elle se transforme! Elle est la source même du travail. En outre, elle peut s'accompagner d'une multitude de qualificatifs, comme « chimique », « potentielle », « hydraulique », et bien d'autres encore...

Toutes ces notions, bien que familières, méritent peut-être un éclaircissement !?

Puisque des exemples concrets valent bien mieux qu'un long discours, nous vous proposons de mesurer par vous-mêmes l'importance et la diversité du thème annuel du Printemps des Sciences en consultant notre Dossier Energie. Celui-ci rassemble des documents réalisés par les chercheurs et professeurs de l'ULB en rapport plus ou moins étroit avec ce thème.

Coordination / rédaction du dossier : Ariane Vlérick

Webmaster : Stéphane Louies

## Sommaire

1. La notion d'énergie : un peu d'histoire!
2. Quelle énergie ? !
3. L'Energie, des jeux de cubes aux antiparticules
4. Travail et énergie
5. L'énergie dans l'écosystème.
6. Les végétaux ont la pêche !
7. Comment notre alimentation influence-t-elle l'augmentation de la taille entre les générations ?
8. L'énergie et le sport
9. L'élasticité d'une seule macromolécule mesurée à l'aide d'un microscope de force atomique (AFM).
10. L'énergie d'aujourd'hui et de demain : le point de vue d'un géologue !
11. L'énergie chimique
12. La Catalyse : Un Art devenu Science
13. Les piles à combustible
14. Energie électrique et ingénierie nucléaire
15. La physique des particules aussi appelée Physique des Hautes Energies
16. La fusion nucléaire contrôlée : une source d'énergie propre et inépuisable ?

## La notion d'énergie : un peu d'histoire !

*Par Jean Olbregts, Chimie Physique Moléculaire,  
Faculté des Sciences de l'Université libre de Bruxelles*

*La notion d'énergie ne se clarifie que tardivement dans l'histoire des sciences. Au 19ème siècle, des personnalités aux centres d'intérêt très divers établissent l'équivalence entre l'énergie mécanique et la chaleur. L'énergie apparaît ainsi sous diverses formes et les idées de transformation et de conservation de l'énergie deviennent centrales. Le 20ème siècle ouvre encore la notion d'énergie avec deux révolutions majeures : la découverte de l'aspect discontinu de l'énergie baptisé quantification de l'énergie et, dans la foulée de celle-ci, la découverte de l'équivalence matière-énergie.*

*Le caractère tardif de ces découvertes souligne la complexité de la notion d'énergie et son aspect quelque peu mystérieux. L'énergie, omniprésente à travers toutes les disciplines scientifiques, semble se cacher et ne révèle ses mystères qu'à l'occasion de ses changements de formes.*

Dans le langage de la vie quotidienne, la notion d'« énergie » est indissociable de la vitalité, du dynamisme, de l'action, du confort et de la performance. Il y a quelques dizaines d'années on mettait un tigre dans son moteur, aujourd'hui on consomme des boissons énergisantes... Dans un monde où seule la performance semble compter, l'énergie apparaît comme un facteur vital au point que, pour certains, il n'est pas envisageable de réduire la consommation d'énergie ni même d'arrêter ou de ralentir sa croissance.

De nos jours, un enfant sait éventuellement très tôt que l'énergie électrique peut se transformer en chaleur dans une plaque de cuisson ou un four à micro-ondes, ou encore que l'énergie chimique peut se transformer en énergie électrique dans une pile ou une batterie. La notion d'énergie n'est cependant pas claire pour autant... Toutefois, un détail est remarquable : la notion d'énergie est associée à l'idée de transformation...

Pour le scientifique également, l'énergie est demeurée longtemps mystérieuse. Ce n'est que depuis le milieu du 19ème siècle, soit environ deux siècles après la clarification du concept de force par Isaac Newton, que la notion d'énergie commence à être éclaircie. Ces progrès très tardifs témoignent sans doute du caractère complexe de l'énergie.

### Premières étapes scientifiques décisives

A la fin du 18ème siècle, la distinction entre température et chaleur demeure confuse. En 1798, Benjamin Thompson, Comte de Rumford, surveille le forage de tubes à canon en cuivre à l'arsenal de Munich. Il est bien connu à l'époque que cette opération chauffe fortement les pièces. Ceci est interprété tout naturellement comme la libération d'un fluide contenu dans la matière, le calorique, lorsque la mèche rogne le métal. Un jour, Thompson constate que, lorsqu'on utilise une mèche mal affûtée, l'échauffement est beaucoup plus important alors que la pénétration de l'outil est insignifiante. Il est ainsi frappé



Isaac Newton

par le caractère inépuisable de cette source de chaleur qui ne peut donc provenir de la matière elle-même mais du travail mécanique fourni. Il note :

*« Je suis persuadé que l'habitude de bien observer ce qui se passe dans le cours ordinaire de la vie a plus souvent conduit, comme par hasard ou par le vagabondage folâtre de l'imagination mise en action par la contemplation des phénomènes les plus communs, à des doutes utiles et à des projets sensés d'investigation et de perfectionnement que les méditations les plus profondes des philosophes dans les heures expressément consacrées à l'étude... D'où vient la chaleur produite par l'opération mécanique du forage des canons ? Est-elle fournie par les copeaux qui sont séparés par la tarière de la masse solide du métal ?... En réfléchissant sur ce sujet, nous ne devons pas oublier de prendre en considération cette circonstance hautement remarquable que la source de chaleur produite, dans ces expériences, par le frottement paraissait manifestement inépuisable. Il est à peine nécessaire d'ajouter que ce qu'un corps isolé quelconque, ou un système de corps, peut continuer à fournir sans limitation, ne peut pas être une substance matérielle... »*

**Cité par A.Einstein et L.Infeld dans « L'évolution des idées en physique », traduit par M.Solovine, Flammarion**

Il faut cependant encore attendre près d'un demi-siècle pour voir progresser les idées de façon significative. C'est en 1842 que Julius Robert Mayer, un médecin allemand, établit une corrélation entre chaleur et travail mécanique, deux formes de l'énergie. Il est le premier à proposer une Loi de conservation de l'énergie. L'année suivante, James Prescott Joule, un brasseur anglais, mesure l'augmentation de température produite par l'agitation mécanique de l'eau et en déduit une équivalence entre travail mécanique et chaleur. Enfin, en 1847, Herman Ludwig von Helmholtz produit un article fondamental intitulé Sur la conservation de l'énergie.

Il faut noter que les bases expérimentales qui ont mené à ce progrès significatif dans la clarification du concept d'énergie est le fait d'« amateurs » : Rumford est un aventurier américain, ministre de la guerre en Bavière, Mayer est médecin et Joule est brasseur. Aucun n'est physicien.

Quelques années plus tard, en 1853, la notion d'énergie potentielle est introduite. Le pot de fleurs déposé sur la tablette de fenêtre du 5ème étage possède une énergie potentielle d'autant plus élevée qu'il est juché haut. Si la tablette se dérobe, le pot dégringole. Il réalise son énergie potentielle sous forme d'énergie cinétique : au cours de la chute, l'énergie cinétique du pot de fleurs croît avec sa vitesse tandis que son énergie potentielle diminue avec son altitude. De la même manière, un objet fixé à un ressort tendu possède une énergie potentielle qui peut se réaliser en énergie cinétique au moment où le ressort est libéré.

## Les grandes révolutions de la physique au 20ème siècle

Le début du 20ème siècle connaît encore quelques révolutions importantes en matière de conception de l'énergie.

Max Planck fait un premier pas vers la théorie de la quantification. En décembre 1900, il établit qu'une substance ne peut émettre de la lumière qu'à certaines énergies. Ceci implique que certains processus physiques ne sont pas continus et ne peuvent produire que des quantités spécifiques d'énergie qu'il baptise le quantum d'énergie.

Peu de temps après, en 1902, Philipp von Lenard établit que l'effet photoélectrique présente un seuil par rapport à la longueur d'onde, mais non pas par rapport à l'intensité de la lumière.

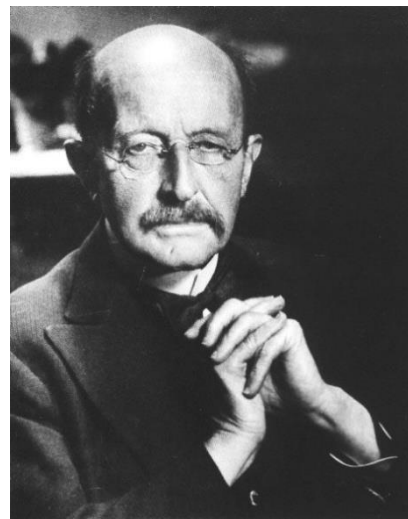
Le 17 mars 1905, Albert Einstein fournit l'explication de l'effet photoélectrique : la lumière est de nature corpusculaire, c'est-à-dire qu'elle est constituée de photons, grains élémentaires d'énergie lumineuse, caractérisés par leur longueur d'onde ( $\lambda$ ) ou leur fréquence ( $\nu$ ). Ces deux grandeurs sont reliées entre elles par la vitesse de la lumière ( $c = \lambda \nu$ ). Dans les mois qui suivent, Einstein publie encore 2 articles sur sa théorie de la relativité par laquelle il établit son équation, devenue célèbre,

$$E = mc^2$$

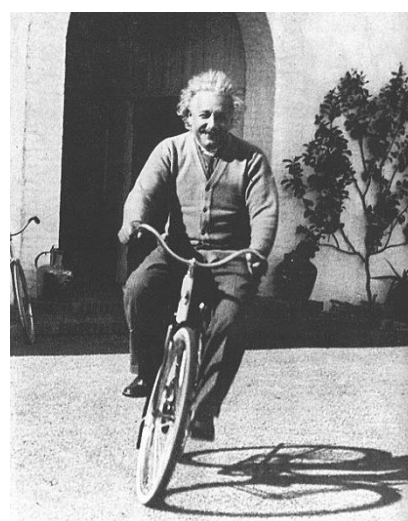
Cette équation établit l'équivalence selon laquelle la matière se transforme en énergie et vice-versa. Ces transformations de matière en énergie trouvent notamment leur application dans la production d'énergie nucléaire par fission ou fusion de noyaux. Ces processus sont à l'oeuvre depuis l'origine de l'univers dans les étoiles. Notre principale source d'énergie, le soleil, consomme son hydrogène, le fusionne en hélium et libère ainsi des quantités énormes d'énergie aux dépens des faibles pertes de masses occasionnées par cette fusion nucléaire.

Pour mesurer l'importance et la complexité de l'introduction de cette physique nouvelle et des quanta, écoutons un des acteurs de cette révolution, Louis De Broglie :

*« Parmi ceux qui jetteront les yeux sur la couverture de ce petit livre, beaucoup seront intimidés par la vue de ces mots mystérieux : les quanta. Le grand public a, en effet, quelques idées vagues -oh ! souvent très vagues- sur la théorie de la relativité dont il a été beaucoup question, il y a quelques années. Mais ledit grand public a, je crois, peu d'idées -même vagues- sur la théorie des quanta. Il faut bien le dire, il est assez excusable, car les quanta sont chose bien mystérieuse. Pour ma part, j'avais quelque vingt ans quand j'ai commencé à m'occuper d'eux et cela fait un quart de siècle que je médite à leur sujet : eh ! bien, je dois l'avouer humblement, si je suis parvenu au cours de ces méditations à comprendre un peu mieux quelques-uns de leurs aspects, je ne sais vraiment pas encore au juste ce qui se cache*



M. Planck



Albert Einstein

*derrière le masque dont se couvre leur visage. Néanmoins, une chose me paraît pouvoir être affirmée : malgré l'importance et l'étendue des progrès accomplis par la physique dans les derniers siècles, tant que les physiciens ont ignoré l'existence des quanta, ils ne pouvaient rien comprendre à la nature intime et profonde des phénomènes physiques car, sans quanta, il n'y aurait ni lumière, ni matière et, s'il est permis de paraphraser un texte évangélique, on peut dire que rien de ce qui a été fait n'a été fait sans eux. »*

**L. De Broglie, « La Physique Nouvelle et les quanta », Flammarion 1937**

Les propos de Louis De Broglie, Prix Nobel de Physique en 1929, restent d'actualité : nous ne pouvons pas ignorer les quanta et cependant nous devons rester modestes quant à la maîtrise de ce concept dont même des génies ont bien du mal à percevoir tous les détails !

### **En guise de conclusion...**

L'énergie est un sujet de préoccupation majeur des citoyens de ce début de 3ème millénaire à bien des points de vue : de l'économie à l'écologie en passant par le développement. Elle est également omniprésente dans les diverses disciplines scientifiques. Le Printemps des Sciences 2002, qui a l'énergie pour thème, aura été passionnante occasion de dialoguer entre la communauté scientifique et le grand public.

## Quelle énergie ?!

*Par Par Pasquale Nardone, Service de Physique Générale  
Faculté des Sciences de l'Université libre de Bruxelles*

*L'énergie est une notion qui, pour le public, semble posséder une multitude de formes, de sens et de définitions. Pourtant, pour le physicien, créateur de ce concept, l'énergie n'est qu'un seul objet qui ne prend que très peu de formes différentes.*

L'énergie : voilà un terme utilisé tout le temps et à tout propos. Ne parle-t-on pas d'énergie thermique, d'énergie chimique, d'énergie mécanique, ou encore d'énergie nucléaire, électrique, magnétique ?...

Pourtant, la réalité qui se cache derrière cette diversité est beaucoup moins variée.

Tout d'abord, il y a deux types d'énergie :

- l'énergie associée au mouvement, à la vitesse : c'est l'énergie cinétique;
- l'autre, associée aux forces physiques, même quand rien ne bouge : c'est l'énergie potentielle.

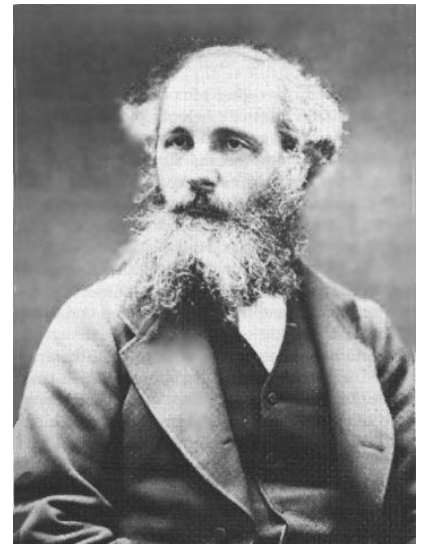
Comme il y a plusieurs forces physiques, il y a plusieurs énergies potentielles.

En physique, il n'y a que 4 forces fondamentales :

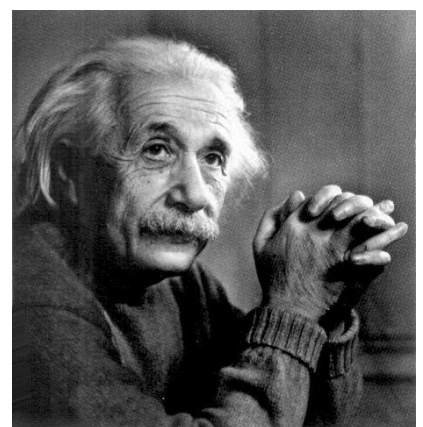
- la force de gravitation ou attraction universelle, responsable de l'attraction mutuelle de tous les corps massifs. La physique en déduit le mouvement des planètes, le mouvement des satellites, l'équilibre des ponts, ....
- Il y a donc une énergie potentielle gravitationnelle.
- la force électromagnétique, qui nous apparaît sous deux aspects : une force électrique et une force magnétique. Mais, depuis la fin du 19ème siècle avec Maxwell et le début du 20ème avec Einstein, nous savons qu'elles ont une origine unique. C'est pourquoi nous parlons de force électromagnétique.
- les troisième et quatrième forces sont bien trop mystérieuses pour être expliquées ici. Ce sont les forces nucléaires, nécessaires pour comprendre le noyau de l'atome et la radioactivité.

L'énergie cinétique et les énergies potentielles sont liées par une propriété très importante : la somme de l'énergie cinétique et des énergies potentielles ne change jamais ! Les physiciens disent qu'il y a conservation de l'énergie totale.

Si l'énergie totale ne change pas, seuls des échanges entre l'énergie cinétique et les différentes formes d'énergie potentielle sont possibles.



Maxwell



Albert Einstein



## Quelques exemples...

Lorsqu'une voiture est arrêtée par un choc, son énergie cinétique devient nulle. Or elle ne l'était pas avant le choc. Où est-elle donc passée, puisque l'énergie totale ne change pas ?

Elle s'est forcément transformée en énergie potentielle...

Ce sont les forces mises en jeu quand la voiture s'est pliée, cassée, etc... qui ont travaillé, comme disent les physiciens. Quelles forces ? En fait, seule la force électrique est intervenue. La gravitation ne joue pas ici. La force de «cohésion» qui garantit la structure de la voiture, dans les tôles, dans les plastiques, dans la ceinture de sécurité, etc... sont toutes de la même origine : électrique !

Dans une centrale hydroélectrique, l'énergie de la chute de l'eau est transformée en électricité. Dans la chute, la force gravitationnelle intervient bien entendu : c'est de l'énergie gravitationnelle qui est transformée en énergie cinétique de rotation dans la turbine. Celle-ci transforme ensuite cette énergie cinétique notamment en énergie électrique.

Lorsque le vent met en route l'éolienne, c'est son énergie cinétique qui est convertie principalement en énergie électrique.

L'énergie des piles ou des batteries provient directement des liaisons chimiques qui sont des liaisons électriques. En modifiant les molécules, ce que les chimistes appellent « faire une réaction chimique », on récupère cette énergie électrique pour l'utiliser ailleurs.

En brûlant du mazout, les liaisons chimiques sont brisées pour en fabriquer d'autres : il y a réaction chimique. Les nouvelles liaisons contiennent moins d'énergie que les anciennes. Comme l'énergie totale ne change pas, la différence se retrouve dans l'énergie cinétique. Les nouvelles molécules formées sont animées de grandes vitesses. Dans le monde moléculaire, la température est le nom que l'on donne à cette agitation. Chauffer plus, c'est agiter plus les molécules.

Les hommes manipulent, depuis 1944, non plus les liaisons électriques entre les atomes, mais les liaisons dans les noyaux de ces atomes : c'est l'énergie nucléaire. En fissionnant (cassant) les noyaux de certains atomes (uranium, plutonium,...), nous avons réussi à transformer une partie de l'énergie nucléaire en énergie cinétique et fabriqué ainsi de la chaleur convertie ensuite en électricité ! Le reste est malheureusement perdu en rayonnements : c'est la radioactivité des centrales nucléaires.

Le Soleil et les étoiles transforment aussi leur énergie nucléaire en énergie cinétique et électromagnétique : ils chauffent et émettent de la lumière. Cependant, ils ne cassent pas les noyaux en morceaux mais fusionnent les noyaux d'hydrogène pour en faire des noyaux d'hélium. Ce n'est plus de la fission mais de la fusion nucléaire.

En conclusion, tous les noms utilisés pour qualifier le type d'énergie ne représentent en somme que les quelques catégories d'énergie cinétique et d'énergies potentielles gravitationnelle, électromagnétique ou nucléaires.

## Quelques précisions

Où cache-t-on la notion de travail ? La physique nous dit que : « si l'énergie cinétique d'un corps change, alors sa variation résulte du travail d'une force ». Le travail de la force deviendra une différence d'énergie potentielle si ce travail ne dépend que du point de départ et du point d'arrivée et pas de la trajectoire suivie entre ces points. On dit que cette force est conservative. Le travail et l'énergie potentielle sont donc deux notions équivalentes. Précisons enfin qu'en physique toutes les forces fondamentales sont conservatives.

À la lumière des développements récents comme la relativité restreinte, la relativité générale et la mécanique quantique, ces notions de travail et d'énergie ont grandement évolué. Elles sont devenues plus complexes, et ont peut-être même perdu de la pertinence. Par exemple, en relativité générale, la gravitation est vue comme une déformation de l'espace-temps. Il en résulte une perte du sens de l'énergie gravitationnelle. Il n'y a pas à proprement parler d'énergie gravitationnelle ! Quand on en parle, on utilise plutôt des métaphores et des images « newtoniennes » qui ne sont plus exactes.

Un dernier point, absolument capital pour la physique, est que toutes les conservations -celle de l'énergie, celle de la quantité de mouvement ou celle encore du moment angulaire- se déduisent de « propriétés de symétrie » des lois physiques. C'est parce que les lois de la physique se veulent être indépendantes de la « valeur » du temps, c'est-à-dire de l'heure à laquelle on les mesure, que l'énergie est conservée. De même, les lois ne changent pas si on change d'endroit dans l'espace ou si on change de direction. Ce lien entre les symétries de l'espace-temps et les lois de conservation de la physique constitue un pilier de la physique moderne.

## L'Energie, des jeux de cubes aux antiparticules

Par Jean-Marie Frère, Service de Physique théorique  
Faculté des Sciences de l'Université libre de Bruxelles

*L'énergie est-elle, comme le feu de Prométhée, une notion mythique, l'une des clés de la compréhension de la Nature? Nous nous inspirons d'un exemple dû à Richard Feynman (Prix Nobel de physique !) pour explorer le concept d'énergie ; même si l'exemple est puéril, il montre une définition dynamique de la notion d'énergie, pour parvenir précisément à une quantité conservée, à des lois intelligibles à notre esprit. Par ailleurs, nous examinons quelques propriétés ou conséquences de la notion d'énergie dans des domaines moins familiers, tels la mécanique quantique ou la relativité, et voyons comment cette notion, peut-être introduite pour des raisons subjectives, a conduit à des découvertes surprenantes.*

Nous commencerons par une question un peu philosophique : « que signifie la conservation de l'énergie ? » Plus précisément, devons-nous y voir une « loi de la Nature », préexistante, que nous avons eu la perspicacité de découvrir, ou plutôt une pure création humaine, qui nous permet simplement d'appréhender notre environnement sous une forme traitable par notre cerveau ?

La question est évidemment plus générale que la notion d'énergie, et s'applique à l'ensemble des « lois physiques ». Nous ne prétendons pas la résoudre ici.

L'image de lois « préexistantes » est souvent confortée par l'idée d'une description mathématique universelle, indépendante des applications, mais je crois que c'est à tort que l'on en tirerait argument. L'on sait en effet combien la description des lois physiques a contribué au développement des mathématiques, ce qui ne fait que reporter une étape plus loin la question de départ.

J'aimerais au contraire reprendre ici une image que je trouve très parlante de la notion de conservation d'énergie. On en trouvera une description à la fois amusante et détaillée dans le très célèbre cours de Richard Feynman; je me contenterai de paraphraser ici l'argument.

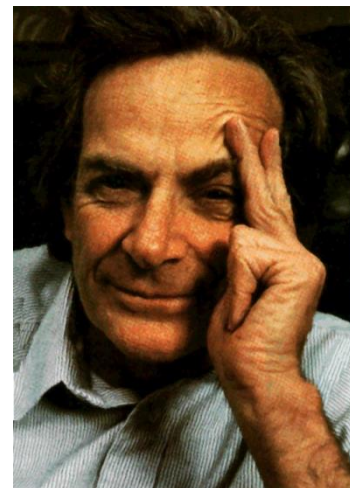
Feynman évoque une comparaison avec une maman qui, chaque soir, range le jeu de cubes de son jeune enfant. Les cubes sont identiques, indestructibles, et elle en compte toujours le même nombre. Ceci la conduit à formuler la loi :

**Le nombre de cubes est constant dans le temps.**

Un jour toutefois elle constate que des cubes manquent, mais les aperçoit dans le jardin, sans doute lancés là par la fenêtre ouverte. Les ayant récupérés, elle formule sa loi de façon plus précise :

**Si toutes les fenêtres restent fermées, le nombre de cubes est constant.**

Mais voici qu'un soir plusieurs cubes ont disparu, tandis que l'enfant refuse obstinément d'ouvrir sa boîte à trésors. Avec un peu d'ingéniosité, la maman pèse un cube, et ne tarde pas à établir une nouvelle loi, plus générale :



R.Feynman

Si toutes les fenêtres restent fermées, le nombre de cubes, additionné de l'accroissement de la masse de la boîte à trésor, divisé par la masse d'un cube, est constant.

Elle trouve d'ailleurs plus commode d'utiliser la formulation suivante :

$$n_{cubes}(t) + \frac{(m_{trésor}(t) - m_{trésor}(t_0))}{m_{cube}} = n_{cubes}(t_0) \quad (1)$$

où  $m_{trésor}(t_0)$  est naturellement la masse de la boîte à trésors au début de l'expérience, quand elle ne contenait aucun cube.

Le récit de Feynman se poursuit : fenêtres toujours fermées, un beau soir, l'équation ci-dessus n'est plus satisfaite... mais la maman remarque que le niveau de l'eau de la baignoire est un peu plus élevé que d'ordinaire après le débarbouillage de son rejeton ; l'eau est fort sale, et elle ne peut en apercevoir le fond mais, mesurant le volume d'un cube, elle complète son équation :

$$n_{cubes}(t) + \frac{(m_{trésor}(t) - m_{trésor}(t_0))}{m_{cube}} + \frac{(\text{niveau}_{eau}(t) - \text{niveau}_{eau}(t_0)) \times S_B}{\text{volume}_{cube}} = n_{cubes}(t_0) \quad (2)$$

où  $S_B$  représente la surface de la baignoire.

Nous laisserons au lecteur la fantaisie d'imaginer d'autres péripéties -qui l'amèneront à ajouter des termes à la somme- mais, par souci de commodité, nous ré-écrivons maintenant cette équation sous une forme à peine différente (les quelques points sont laissés à l'imagination du lecteur) :

$$\begin{aligned} n_{cubes}(t) + \frac{m_{trésor}(t)}{m_{cube}} + \frac{\text{niveau}_{eau}(t)}{\text{volume}_{cube}} \times S_B + \dots \\ = n_{cubes}(t_0) + \frac{m_{trésor}(t_0)}{m_{cube}} + \frac{\text{niveau}_{eau}(t_0)}{\text{volume}_{cube}} \times S_B + \dots \\ = \text{constante} \end{aligned} \quad (3)$$

L'exemple choisi par Feynman est bien sûr ludique, mais l'on pourrait en tirer une série d'enseignements. Nous réserverons la remarque la plus importante de Feynman pour la fin.

Le plus évident, c'est la recherche d'une **loi de conservation** : le souci de définir à travers toutes ces péripéties une quantité qui ne varie pas dans le temps, même si cela implique de compliquer considérablement la définition de cette quantité. Nous ne nous interrogerons pas davantage sur les raisons psychologiques ou autres de rechercher une telle loi de conservation ; de façon purement pragmatique, le fait qu'une quantité soit constante simplifie souvent la résolution d'un problème physique.

Par ailleurs, même à ce niveau de raisonnement élémentaire, on peut observer la commodité d'une formulation « mathématique » : sans cela, les énoncés deviennent vite lourds et peu commodes à manipuler. Le choix de cette notation est déjà la recherche d'une adéquation du formalisme au mode de traitement le plus efficace.

Cette allégorie se compare évidemment à la **conservation de l'énergie** tout est effectivement transposable, la conservation de l'énergie d'un **système isolé** (correspondant aux fenêtres fermées) consiste aussi dans la constance d'une somme comprenant des termes assez hétéroclites, ajoutés au fil du temps pour pallier à des manquements de la formulation initiale. On y trouve pêle-mêle l'**énergie cinétique** -des carrés de vitesses (chers aux émissions de sécurité routière)- et l'**énergie potentielle**, qui peut revêtir des formes très variées, liées à la hauteur d'un objet ou à l'extension d'un élastique. On y rencontre aussi peut-être le carré d'un champ électrique ou magnétique, voire la température d'un solide ou d'un liquide, la pression d'un gaz, la masse d'un noyau, un nombre de particules émises ou absorbées,...

***Mais la remarque la plus importante de Feynman est sans doute la dernière qu'il ait formulée*** : dans l'analogie avec la conservation de l'énergie, on ne retrouve pas l'équivalent... des blocs !

Et c'est fondamental car, dans le raisonnement précédent, nous avons admis au départ l'existence d'un objet matériel indestructible, qui justifiait toute la démarche et l'introduction des termes successifs, tandis que, dans le contexte de l'énergie, nous ne possédons que la somme de termes hétéroclites analogues aux différentes fractions de notre équation. L'énergie est donc une notion bien plus abstraite que ne le suggérait l'exemple choisi, et rien (sinon peut-être l'existence même d'une loi de conservation) ne laisse supposer qu'une telle notion soit pré-existante à notre démarche.

***La conservation de l'énergie : loi de la Nature découverte par les scientifiques avec une précision croissante à travers les âges ou invention de notre esprit pour lui permettre d'appréhender le monde, ajustée (rafistolée ?) à chaque étape ?*** Je m'abstiendrai de trancher, laissant au lecteur le soin de se forger une opinion.

Peut-être n'est-ce aussi qu'une fausse question... Il serait intéressant d'approcher une autre démarche conduisant aux lois de conservation. En effet, une formulation moderne de la physique associe étroitement les principes de conservation à la présence d'invariances d'un système sous diverses transformations. Par exemple, la **conservation de la quantité de mouvement** est ainsi étroitement liée à l'**invariance de translation** (il n'y a pas d'origine privilégiée), et la **conservation de l'énergie** aux **translations temporelles** (le système ne connaît pas d'instant privilégié). Les principes de conservation ne sont alors que le reflet logique de ces hypothèses (ou de ces idéalizations).

## Relativité et énergie

L'avènement de la relativité restreinte a apporté une surprise dans la définition de l'énergie.

Si nous prenons l'exemple de l'équation (3) ci-dessus, et que nous l'adaptions à l'expression de l'énergie d'une particule neutre, isolée, nous obtenons quelque chose du style :

$$m \frac{v^2(t)}{2} + \dots = m \frac{v^2(t_0)}{2} + \dots = \text{Constante} \quad (4)$$

où nous avons simplement explicité le terme d'énergie cinétique. Mais nous sommes bien évidemment libres d'ajouter n'importe quel terme constant à chacun des membres de l'équation. En effet, en théorie **non relativiste**, l'énergie, même d'une particule libre, n'est définie « qu'à une constante arbitraire près ». Il n'en va pas de même dans une approche **relativiste**, même si nous n'en donnons pas ici la démonstration (voir remarque ci-contre). On trouve en fait l'expression unique :

$$E = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \cong mc^2 + \frac{mv^2}{2} + \dots \quad (5)$$

Dans cette équation,  $c$  représente la vitesse de la lumière dans le vide, et le membre de droite est une approximation valable dans la limite où les vitesses  $v$  sont nettement inférieures à la vitesse de la lumière. On retrouve bien l'expression familière de l'énergie cinétique, mais on constate aussi que la constante est maintenant fixée de manière unique et qu'elle dépend de la masse de la particule.

L'histoire de ce terme est bien connue, puisqu'elle est à l'origine des développements de la physique nucléaire d'abord, de la physique des particules ensuite. Il montre que la masse des particules fait partie du bilan d'énergie, mais on en déduit aussi que cette énergie peut être libérée par désintégration de la particule. A l'inverse, la concentration d'une quantité d'énergie suffisante dans un très petit volume (comme lorsque des particules légères mais de haute énergie sont lancées les unes contre les autres à l'aide d'un accélérateur) peut créer des particules plus lourdes. A titre d'exemple, l'accélérateur LEP au CERN réalise le choc d'un électron et d'un antiélectron pour créer des particules (comme le boson intermédiaire Z) de masse près de 100.000 fois plus élevée que celle des particules initiales !

La démonstration est simple, et ne demande pas de mathématiques au-delà de celles enseignées dans le secondaire ; qu'il suffise ici de préciser que, comme les concepts d'espace et de temps sont unifiés en théorie relativiste (conduisant à des vecteurs à  $3 + 1$  composantes,  $(r, ct)$ ), la même unification lie la quantité de mouvement ( $p=mv$ ) et l'énergie pour former le vecteur  $(p, E/c)$ . Comme la définition de la quantité de mouvement dans un référentiel donné ne comprend pas de constante arbitraire, l'énergie qui y est associée est elle aussi définie de manière unique. Remarque : conformément à la notation usuelle,  $c$  représente ici la vitesse de la lumière dans le vide.

On trouvera dans l'intéressante brochure de R. Carreras: « Et l'énergie devint matière », diffusée par le CERN, une présentation illustrée de ce domaine de la physique

## Energie du vide et mécanique quantique

Il n'est peut-être pas inutile d'évoquer ici la situation de la mécanique quantique. L'une des hypothèses de base en est que l'on ne peut mesurer simultanément, avec une précision arbitrairement élevée, la position et la vitesse d'une même particule. Cela veut dire que, si je spécifie de façon absolument précise la position d'une particule, je perds toute information sur sa vitesse et réciproquement. Envisageons maintenant l'image d'un petit oscillateur, c'est-à-dire par exemple d'une particule retenue par un ressort, dont nous négligerons la masse, et réfléchissons à ce que cette situation implique pour la description de l'énergie.

Puis-je placer ma particule dans un état d'énergie nulle ? Si je spécifie la position « de repos », je ne connais plus la vitesse, et donc l'énergie cinétique : je ne pourrais donc certainement pas affirmer qu'elle est nulle. Par contre, si je précise une énergie cinétique (et donc une vitesse) nulle, je perds toute information sur la position, à laquelle est associée l'énergie potentielle due au rappel du ressort. Il en résulte que, même dans son état « de repos », cet oscillateur (la particule attachée à son ressort) doit posséder une énergie non nulle. On montre en effet que les niveaux énergétiques successifs d'un oscillateur, dans le traitement quantique sont :

$$E_n = h \nu (n + 1/2) \quad (6)$$

où  $n$  représente la fréquence de résonance de l'oscillateur. On constate donc que, en-dehors des excitations successives caractérisées par des niveaux d'énergie bien séparés, correspondant à l'émission ou l'absorption d'un quantum, figure un terme constant, présent même en l'absence d'excitation ( $h\nu/2$ ) : il s'agit de l'« énergie de repos ».

Son importance apparaît pleinement en théorie quantique relativiste, et plus spécialement en « théorie quantique des champs » où la description des particules élémentaires se ramène au traitement de tels oscillateurs. L'état d'énergie le plus bas d'un système quantique est communément appelé « vide ». Il en résulte que ce vide, état d'énergie minimum, comporte quand même une certaine densité d'énergie, dont l'importance apparaît d'ailleurs dans les traitements cosmologiques.

## Energie négative ou antiparticules ?

Le sujet surgit un peu sous la plume, car il m'est difficile de mentionner côte à côte la mécanique quantique et la relativité restreinte sans évoquer l'une des conséquences importantes de leur unification. En effet, lorsqu'on vient à formuler une mécanique quantique relativiste, on sait que le temps et la position doivent être traités sur le même pied, et l'on peut montrer qu'il en va de même de l'énergie et de la vitesse ou, plus exactement, de la quantité de mouvement  $mv$ .

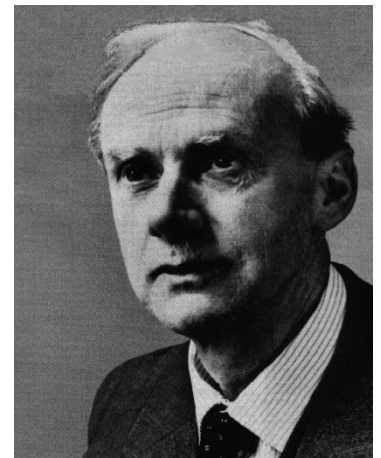
Lorsque l'on écrit de telles équations, ce n'est pas l'équation (5) ci-dessus qui apparaît directement, mais plutôt son carré, et il en résulte deux solutions : l'une positive, l'autre négative. Comme l'énergie relativiste est définie sans l'ambiguïté d'une constante (voir remarque ci-contre), nous n'avons pas choix de redéfinir le zéro d'énergie, et nous devons bien faire face à une quantité d'énergie négative. C'est le formalisme de la théorie quantique des champs qui y apporte cette fois réponse. Une telle théorie doit en effet rendre compte de la possibilité de créer et détruire des particules et, plutôt que de décrire les particules elles-mêmes, elle formule les équations pour les opérateurs de création et de destruction de particules. Une ré-interprétation simple se présente alors : sans modifier le bilan énergétique du système, on peut substituer les notions comme suit, au niveau de ces opérateurs :

Création d'une particule d'énergie  $-w$   $\leftrightarrow$  Destruction d'une antiparticule d'énergie  $+w$

Destruction d'une particule d'énergie  $-w$   $\leftrightarrow$  Création d'une antiparticule d'énergie  $+w$

Cette conséquence simple de l'association de la mécanique quantique et de la relativité restreinte conduisit ainsi **Dirac** à postuler l'existence d'**antiparticules**, possédant exactement la même masse, mais des charges (par exemple électrique) opposées aux particules correspondantes. Leur découverte, d'abord dans le rayonnement cosmique car on ne disposait pas d'accélérateurs assez puissants à l'époque, constitue une vérification remarquable du pouvoir prédictif d'un tel traitement théorique, et vérifie l'adéquation du formalisme aux phénomènes à décrire...jusqu'à la prochaine remise en cause du cadre théorique par l'expérience !

Ce problème ne se poserait pas de la même manière en théorie non relativiste, où le zéro d'énergie est purement conventionnel ; la question de la stabilité du système se poserait toutefois.



P.A.M. Dirac



# Travail et énergie

Par Albert Art, Professeur honoraire

Faculté des Sciences de l'Université libre de Bruxelles

Les physiciens établissent des théories à partir de « modèles » et de concepts qui leur ont permis d'écrire des expressions mathématiques pour définir les différentes énergies telles que l'énergie « cinétique » qui est relative à la vitesse, ou celles qui sont liées à la présence d'un champ dû à la gravitation ou à des charges électriques. Ces champs donnent lieu à des énergies potentielles, c'est-à-dire des énergies qui peuvent être « potentiellement » disponibles à tout moment. Il en existe encore d'autres, dont l'énergie calorifique qui est le stade « dégénéré » dans lequel les énergies peuvent se retrouver en dernier lieu. Le travail, également défini par le physicien, nécessite toujours de l'énergie pour être effectué. Mais il peut également produire de l'énergie. D'autre part, on ne peut jamais créer de l'énergie mais on peut transformer une forme d'énergie en une autre ou bien utiliser de l'énergie pour produire un travail. Le texte proposé illustre ces différentes notions par des exemples simples.

Qu'advient-il alors des énergies nécessaires à la vie moderne de l'homme ? Sachant que les scientifiques ont montré qu'il était impossible de créer de l'énergie, il est par conséquent nécessaire de la puiser dans notre environnement. Parmi ces énergies disponibles, il y en a de deux sortes :

- 1) celles qui ne sont probablement pas épuisables : ce sont celles tirées du vent, des rivières, des barrages, du rayonnement solaire, des marées, de la géothermie, et peut-être un jour de la fusion nucléaire ;
- 2) celles qui sont épuisables comme le sont celles tirées du pétrole et de ses produits dérivés, le gaz, le charbon, le bois.

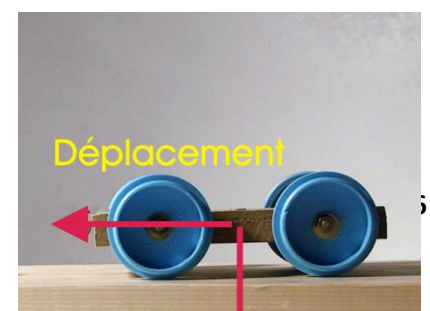
Ces dernières une fois taries, il ne restera plus que les premières pour subvenir à nos besoins. Les recherches de nouvelles technologies servent en particulier à améliorer les rendements des appareils, comme les moteurs, les lampes d'éclairage, etc.

Dans la vie courante, il y a des termes qui sont souvent utilisés et dont la signification fait penser à celle donnée aux concepts définis par les scientifiques. Ce sont notamment les mots « énergie » et « travail ».

Par exemple, l'employé de bureau, l'étudiant, l'écrivain... de même que le mécanicien, le maçon,... disent « je pars travailler et il me faudra de l'énergie pour ce faire ! ».

Le physicien dira : « cette force, en se déplaçant, travaille, mais pour cela elle a besoin d'énergie ». Par conséquent, en puisant de l'énergie, la force peut effectuer un travail qui peut être converti en une autre sorte d'énergie, qui peut à nouveau être reconvertie en travail. Voilà de quoi jeter le trouble dans les esprits non avertis !

Pour le physicien le concept de travail est simple : dès qu'il y a déplacement d'une force, celle-ci effectue un travail, pour autant que force et déplacement ne soient pas perpendiculaires l'une à l'autre.



Ce travail est proportionnel à l'intensité de la force (petite, grande) mesurée le long de sa ligne de déplacement (la direction) et à la distance parcourue. Connaissant la valeur de la force **F**, mesurée le long de la direction et exprimée en newtons, de même que la distance **D** parcourue, exprimée en mètres, le travail **T**, exprimé en joule, peut se calculer en utilisant la formule :

$$T = F \times D.$$

(Attention, ceci n'est pas la formule générale pour calculer un travail, elle ne peut s'appliquer que dans certaines conditions).

Il est clair que cette formule ne permet pas d'évaluer le « travail d'un intellectuel ». Par contre, le travail d'un « manuel » peut s'estimer en utilisant cette formule. En effet, quand il remplit de sable une brouette avec une pelle, la force de pesanteur travaille puisqu'elle se déplace le long du parcours « sol-brouette ». Un calcul approché, à l'aide de la formule précédente, permettrait d'estimer ce travail. Mais la même quantité de travail a été effectuée par le manoeuvre, à la différence que sa force musculaire est dirigée vers le haut alors que la force de pesanteur est de sens inverse... Ces travaux sont donc égaux mais n'ont pas le même signe. Il y a donc un travail résistant, celui de la pesanteur, qui s'oppose au mouvement et un travail moteur, celui de l'ouvrier, qui fait monter la pelle. Mais ce travail nécessite de l'énergie que les muscles prendront à leur système biologique, lui-même la prenant à la nourriture absorbée. Il y a donc équivalence entre travail et énergie, qui ont tous deux pour unité le joule.

Faisons une expérience par la pensée comme Einstein aimait le faire.

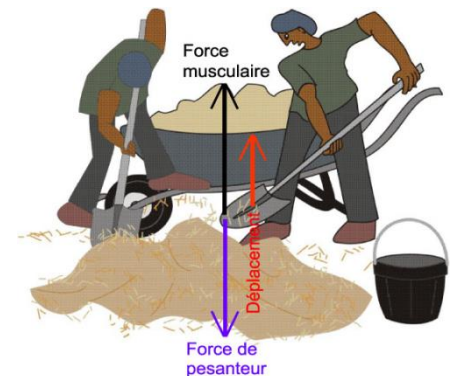
L'ouvrier a abandonné sa brouette remplie de sable sur le chantier.

En la regardant, on pourrait se demander si cette brouette contient de l'énergie. Autrement dit en quoi s'est transformé le travail de l'ouvrier, ou en quoi s'est transformé l'énergie tirée des aliments absorbés ? Pour donner une réponse à cette question, un physicien expérimentateur proposerait l'expérience suivante :

Pratiquer un trou dans le fond de la brouette pour laisser s'écouler le sable sur une roue à aubes placée sous elle. La roue va se mettre à tourner, c'est-à-dire qu'elle va acquérir, grâce au travail de la force de pesanteur agissant sur les grains de sable, une énergie cinétique de rotation qui pourrait à son tour faire tourner une génératrice d'électricité et fournir ainsi de l'énergie électrique.

Celle-ci pourrait alors faire tourner un moteur capable de travailler pour faire remonter notre sable dans le champ gravitationnel et remplir à nouveau la brouette !

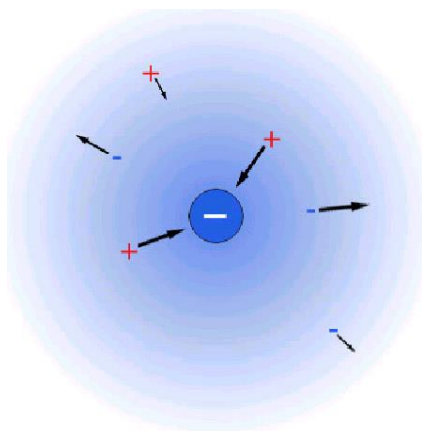
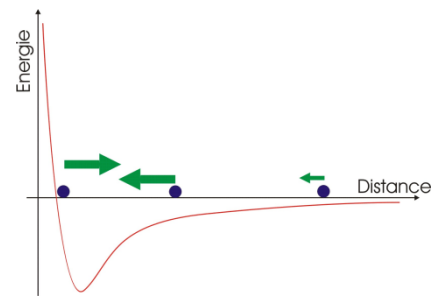
Ce sable dans la brouette contenait donc bien de l'énergie, qui se trouvait sous la forme d'énergie potentielle. Potentielle, parce que **potentiellement** disponible à n'importe quel moment. Cette énergie gravitationnelle est facilement calculable par les lois de la mécanique classique.



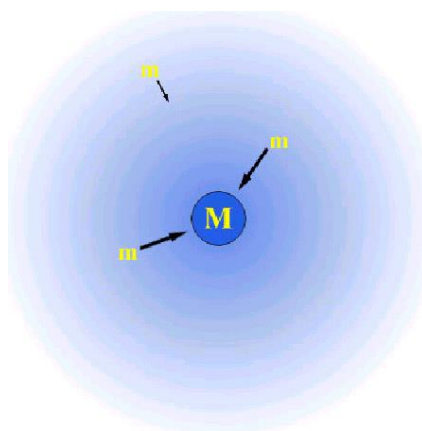
Hélas, le physicien constaterait que la brouette n'est plus remplie comme avant et que la nourriture absorbée ne réapparaîtra plus jamais sous forme de tartines. Dans la réalité, aucun système n'a un rendement de 100%, car il y a toujours des pertes dues à des phénomènes irréversibles, tels que frottements, effet Joule... qui produisent de la chaleur. Le mouvement perpétuel ne peut donc exister.

Il en serait de même pour le travail effectué contre une force électrique qui donnerait naissance à une énergie potentielle électrique, comme dans un condensateur.

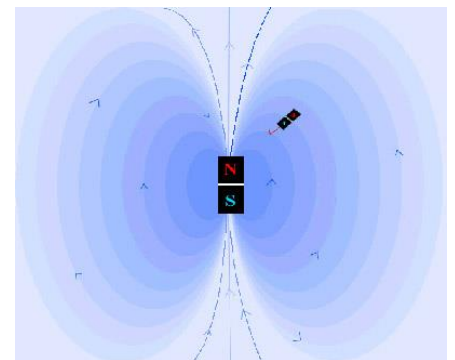
La conclusion est que, dans les « champs de force gravitationnels ou électriques », il est impossible de tirer une quantité d'énergie sans avoir préalablement fourni un travail nécessitant la même quantité d'énergie ! Le seul intérêt est de pouvoir l'utiliser sous une autre forme, comme passer de la potentielle à la cinétique.



Champ électrique



Champ gravitationnel



Champ magnétique

Pourtant, dans le cas du champ de force gravitationnel, la nature nous fait un cadeau : l'eau accumulée dans les lacs d'altitude, les cours d'eau, etc., sont des sources d'énergie, le soleil y contribuant pour une part. Aucun travail, au sens du physicien, n'est nécessaire pour la conversion de ces sources en d'autres formes d'énergie : électrique (centrales hydrauliques), mécanique (scieries, forges, meules à moudre le grain.). Arrivée au niveau de la mer, l'eau a perdu toute son énergie potentielle gravitationnelle au cours de sa trajectoire, notamment sous forme d'énergie cinétique. Celle-ci peut s'observer en regardant l'eau couler dans les rivières avant d'être absorbée dans l'eau de mer.

Par l'exemple simple d'un skieur utilisant un remonte-pente, montrons les différentes manières dont on peut passer d'une énergie à une autre ou comment elle peut se convertir en travail :

le moteur qui fait fonctionner le remonte-pente dépense de l'énergie électrique ; cette énergie est convertie en travail puisque la force de traction dans le câble se déplace pour conférer au skieur un peu d'énergie cinétique (il avance) et de l'énergie potentielle gravitationnelle (il monte), qu'il



Barrage hydraulique

convertit ensuite en énergie cinétique de translation en glissant tout en dépensant de l'énergie potentielle gravitationnelle. Au bas de la pente, il freine pour annuler sa vitesse : pour cela il provoque un jet de neige, et la fonte d'un peu de neige. Lorsque l'énergie se transforme en chaleur, il n'est pas possible de la récupérer intégralement pour effectuer un travail, au contraire des autres types d'énergies qui, comme les énergies potentielle et cinétique, peuvent se transformer intégralement de l'une dans l'autre et vice versa (comme dans le cas de la balançoire ou du balancier de l'horloge s'il n'y a pas de frottement).

Ainsi donc, les énergies cinétique et potentielle peuvent se transformer intégralement en chaleur et en destruction. Par contre, on ne peut pas récupérer intégralement la chaleur libérée dans la neige pour faire remonter le skieur en haut de la pente !

Finalement l'énergie est assez extraordinaire de par ses propriétés :

- elle est soit statique, soit dynamique,
- dans sa globalité elle se conserve,
- elle ne peut pas être créée,
- elle peut prendre toutes sortes de formes,
- si elle est sous forme de chaleur, elle se propage spontanément du « plus chaud » vers le « plus froid »,
- elle peut se cacher dans les aliments ou dans les noyaux des atomes,
- la matière peut se transformer en énergie et inversement...
- puis, en la domptant, on peut la convertir en travail !
- et, à la longue, elle finit par se retrouver sous forme de chaleur.

## Réflexions relatives aux énergies que l'homme peut utiliser pour son confort

Jadis, lorsque les hommes étaient intégrés dans la nature, ils ne bénéficiaient d'aucune autre énergie que celle tirée de leur musculature ou de celle des animaux aux forces musculaires impressionnantes par rapport à la leur. Par la suite, leur intelligence leur a permis de développer quelques outils utilisant des principes simples de physique, découverts par nécessité.

Les frottements ont été utilisés pour faire du feu; ou, en profitant de la capacité qu'ont les pierres de conserver la chaleur, ils chauffaient l'eau contenue dans un récipient en bois en y précipitant les pierres chaudes ; ils ont profité de l'élasticité du bois pour fabriquer des arcs (énergie élastique comme dans les ressorts), des leviers pour déplacer des objets lourds.

Les rivières étaient déjà des sources d'énergie utilisables, grâce à la vitesse des molécules d'eau (courant = énergie cinétique) acquise par la différence de niveau entre l'amont et l'aval. Cette propriété physique a été rapidement exploitée par nos ancêtres, en utilisant des roues entraînées par le courant.

Le vent est une source d'énergie qui a été également exploitée très tôt par les moulins à vent qui sont devenus par la suite les éoliennes. En fait, à cette époque, on ne polluait quasiment pas.



L'homme des contrées industriellement développées s'est actuellement complètement éloigné de la vie dans la nature.

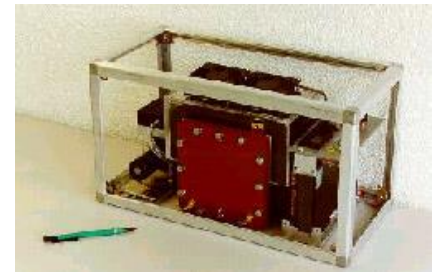
Son mode de vie, par un choix de société, le pousse à consommer énormément d'énergie pour son confort et ses déplacements. Où peut-il la chercher ? Actuellement, les sources sont les produits classiques : principalement le pétrole et ses produits dérivés, le gaz, le charbon. Sources qui, à longue échéance, finiront par se tarir.

L'énergie nucléaire, tirée de la fission de l'atome, présente des dangers de pollution radioactive en cas d'accident auxquels il faut ajouter le problème des déchets radioactifs dus aux réactions nucléaires qui se produisent dans le cœur du réacteur. La fusion nucléaire des atomes, source d'énergie du Soleil, pourrait apporter la solution aux problèmes d'approvisionnement en énergie si sa mise en pratique ne posait pas d'énormes problèmes techniques. A l'heure actuelle, on consomme plus d'énergie qu'on en produit et la réaction nucléaire n'est pas contrôlable.

Actuellement, on tente de réaliser des moteurs utilisant l'hydrogène comme source d'énergie. Ce sera une source d'énergie propre mais, à nouveau, on ne créera pas d'énergie ; c'est la thermodynamique qui nous le montre.

Il reste les énergies qui ont une longue espérance de vie : le rayonnement solaire, la chaleur tirée du sol, l'énergie tirée de la mer, des marées, du vent, celle contenue dans la biomasse. Mais elles demandent parfois de lourds investissements et requièrent de recourir à des batteries d'accumulateurs - sources de pollution - pour les emmagasiner et les rendre disponibles même en l'absence de soleil, de vent, etc. Elles sont très utiles pour fournir de l'électricité ou de la chaleur localement. L'électricité produite peut, dans certaines conditions, être connectée aux réseaux existants.

En conclusion, lorsque toutes les énergies consommables seront épuisées, l'homme ne pourra plus compter que sur le soleil, les marées, le vent, les centrales hydrauliques, et l'énergie nucléaire si on parvient à utiliser la fusion ou si on prend le risque d'utiliser des surgénérateurs (plutonium).



Pile à combustible (H2)

## Energie marémotrice



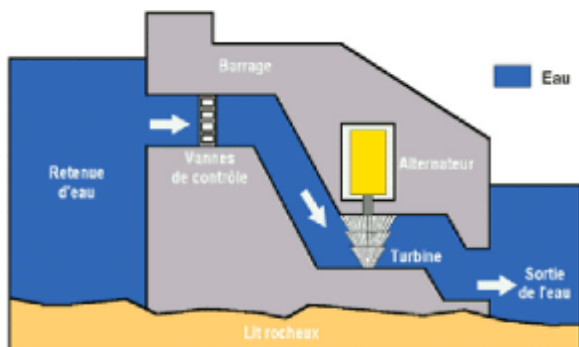
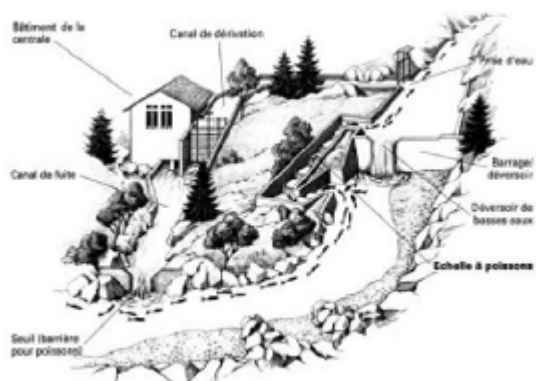
## Energie éolienne



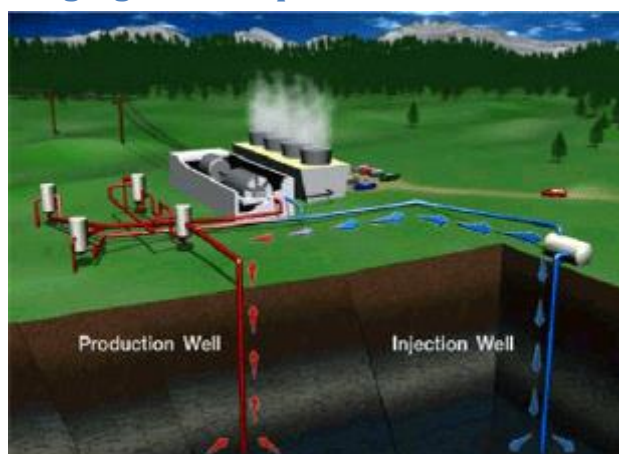
## Energie solaire



## Energie hydraulique



## Energie géothermique



# L'énergie dans l'écosystème

Par Pierre Meerts,

Laboratoire de Génétique et Ecologie végétales

Faculté des Sciences

*Trois formes d'énergie interviennent dans le fonctionnement d'un écosystème : rayonnement de courte longueur d'onde (lumière visible), rayonnement de grande longueur d'onde (chaleur) et énergie chimique (molécules organiques). L'article passe d'abord en revue les différents postes du bilan énergétique d'un écosystème. On insiste sur la faible efficacité de la conversion de l'énergie lumineuse en énergie chimique par la photosynthèse et sur le fait que, dans un écosystème à l'équilibre, toute l'énergie entrant sous forme de lumière est finalement dissipée sous forme de chaleur. Ensuite, on met en évidence la façon dont les plantes maximisent l'interception du rayonnement solaire. Enfin, quelques adaptations mises en oeuvre par les plantes des habitats très ensoleillés et des habitats froids sont évoquées.*

Un écosystème comprend généralement trois groupes fonctionnels d'organismes vivants : des **producteurs** (les plantes), des **consommateurs** (animaux herbivores et animaux carnivores) et des **décomposeurs** (champignons et bactéries du sol). Dans cet article, on se penche d'abord sur les transferts d'énergie entre ces différents groupes fonctionnels. Ensuite, on s'intéresse plus particulièrement aux plantes. On montre que l'architecture des plantes est soumise à des contraintes liées à leur fonction de « panneaux solaires ». Enfin, on examine brièvement quelques adaptations des plantes à deux types d'habitats offrant des contraintes diamétralement opposées du point de vue de l'équilibre thermique : les climats très ensoleillés et les climats froids.

## Les écosystèmes, convertisseurs d'énergie: quelques définitions

Trois formes d'énergie entrent en jeu dans le fonctionnement d'un écosystème :

- le rayonnement électromagnétique de courte longueur d'onde (lumière),
- le rayonnement électromagnétique de grande longueur d'onde (infrarouges : chaleur),
- l'énergie chimique (sous forme de molécules organiques : sucres, etc.).

La conversion de l'énergie lumineuse en énergie chimique a lieu dans les plantes : c'est la **photosynthèse**.

La conversion de l'énergie chimique en chaleur (par oxydation du glucose) a lieu dans les plantes, les animaux et les microorganismes : c'est la **respiration**.

L'analyse du **bilan énergétique des écosystèmes** est fondée sur les deux premiers principes de la thermodynamique. Le premier principe stipule que



l'énergie entrant dans un écosystème est entièrement conservée au cours de son transfert dans les différents compartiments de l'écosystème. Le second principe se manifeste en écologie par le fait que la conversion de l'énergie lumineuse en énergie chimique par la photosynthèse et la récupération de l'énergie chimique contenue dans le glucose par la respiration ne se font pas avec une efficacité de 100 % : des pertes se produisent, sous forme de chaleur.

### 1. Conversion de la lumière en énergie chimique par les plantes

Les plantes reçoivent de l'énergie sous forme de rayonnement électromagnétique de courte longueur d'onde (**lumière**). La **photosynthèse** convertit une partie de cette énergie en énergie chimique, c'est-à-dire en énergie de liaison entre atomes dans la molécule de **glucose**. Cette quantité d'énergie fixée par l'écosystème est la **production primaire brute (PB1)**.

Une partie de cette production brute est brûlée par la **respiration des plantes (R1)**, qui libère de la chaleur. La partie qui n'est pas respirée est la **production primaire nette (PN1)**. On a donc :

$$PN1 = PB1 - R1$$

PN1 est utilisée pour la croissance des plantes (incrément **T1**), la production de litières de feuilles mortes (**L1**) et l'alimentation des herbivores (**C1**). On a donc :

$$PN1 = T1 + L1 + C1$$

### 2. Transferts d'énergie dans les chaînes trophiques

Les animaux herbivores consomment une partie **C1** de **PN1**. Cette énergie se partage en quatre postes :

- accroissement de la taille et du nombre d'individus de la communauté d'herbivores (**T2**),
- respiration des herbivores (**R2**),
- prédation par les carnivores (**C2**),
- cadavres et déchets (**L2**).

Le même raisonnement s'applique aux carnivores (postes **T3**, **R3**, **C3**, **L3**). Il n'y a pas de poste C3 si les carnivores ne sont pas mangés par des prédateurs.

Les déchets et cadavres produits par chaque niveau trophique (**L1 + L2 + L3**) alimentent les organismes du sol, principalement des bactéries et des champignons. Cette énergie se partage en trois postes :

- accroissement de masse des organismes du sol (incrément **T4**),
- accroissement de la quantité de matière organique morte dans le sol (humus : **DH**),
- respiration des organismes du sol (**R4**).

### 3. Bilan d'énergie de l'écosystème

Voyons la répartition finale de l'énergie entrée dans l'écosystème sous forme de production brute **PB**.

$$R = R1 + R2 + R3 + R4$$

Une autre partie peut rester stockée dans l'écosystème sous forme d'**accroissement des populations d'organismes vivants** ( $T = T1 + T2 + T3 + T4$ ) ou d'**accumulation de matière organique morte dans le sol** (humus : **DH**). On a donc :

$$PB = R + T + DH$$

Dans un **écosystème à l'équilibre**, toute l'énergie entrant dans l'écosystème est transformée en chaleur. Dans ces écosystèmes, les populations vivantes et la matière organique morte sur le sol ne grandissent plus ( $T = 0$  et  $DH = 0$ ). La forêt vierge équatoriale est un exemple d'écosystème proche de l'équilibre.

Les **agroécosystèmes** sont maintenus par l'homme **loin de l'équilibre** : ils produisent chaque année un excédent de matière organique qui est récolté par l'homme (production végétale ou production animale).

#### Faible efficacité de la capture d'énergie par les écosystèmes

L'efficacité des plantes dans la capture d'énergie solaire se mesure par le rapport entre **PB** et la quantité totale d'énergie lumineuse reçue. Cette efficacité de la photosynthèse est très faible : moins de 5 %. On peut attribuer ce manque d'efficacité notamment aux facteurs suivants :

1. Les plantes ne peuvent utiliser que la lumière bleue et la lumière rouge ; les autres longueurs d'onde sont mal utilisées (notamment le vert : les plantes nous apparaissent vertes parce qu'elles n'absorbent pas cette couleur !).
2. Une grande partie de la lumière entrant dans une feuille est absorbée par l'eau, les parois cellulaires et d'autres constituants de la feuille avant d'avoir pu être utilisée par la chlorophylle.
3. Les conditions de température, d'humidité, d'alimentation minérale, etc. sont rarement optimales et limitent la vitesse de la photosynthèse.

#### Les arbres en tant que panneaux solaires

Comparons les plantes à des panneaux solaires...

Les panneaux solaires fabriqués par les ingénieurs pour approvisionner une maison en énergie sont des plaques horizontales de grande surface, placées les unes à côté des autres.

Les arbres sont naturellement équipés d'une multitude de très petits panneaux solaires (c'est-à-dire leurs feuilles), disposés en plusieurs couches superposées.

Quel est le système le plus efficace ?

En 1971, **Horn** a montré que ce sont les arbres qui sont plus efficaces.

Soit un panneau solaire de surface **S** qui capte une énergie **E** par unité de temps. Soit un arbre, dont la couche de feuilles supérieure représente un panneau solaire perforé de surface  $S/2$  captant une énergie  $P/2$ . De la lumière traverse ce panneau par les espaces libres existant entre les feuilles. Elle peut ainsi alimenter une seconde couche de feuilles  $S/2$  qui capture aussi une quantité d'énergie  $P/2$ . L'arbre et le panneau solaire sont maintenant à égalité. Toutefois, chez un arbre, de la lumière peut à nouveau traverser cette seconde couche de feuilles et peut en alimenter une troisième, une quatrième, etc.

Au total, les arbres sont plus efficaces parce qu'ils peuvent **répartir la lumière reçue sur une très grande surface de feuilles**. En moyenne, une forêt de nos régions possède **5 mètres carrés de feuilles pour un mètre carré de surface au sol**.

Ce système ne fonctionne bien que si les feuilles d'une couche supérieure ne font pas (ou peu) d'ombre à la couche sous-jacente. Cette condition est respectée **si une distance minimale sépare deux couches de feuilles successives**. Un modèle géométrique simple montre que cette distance vaut

**diamètre de la feuille x distance soleil-terre/diamètre du soleil**

Comme la distance soleil-terre vaut environ 100 fois le diamètre du soleil, on voit que des feuilles de 3 cm de diamètre doivent être espacées d'une distance verticale de 3 mètres pour que la feuille inférieure ne soit pas dans le cône d'ombre projetée par la feuille supérieure.

La structure du feuillage des arbres réels ne suit pas exactement ce modèle, parce que la direction du rayonnement solaire varie au cours de la journée et de l'année.

### **Feuilles d'ombre et de lumière**

Il est évident que les feuilles du sommet d'un arbre et celles de la base de la couronne connaissent des conditions d'éclairement très contrastées. Elles ont des structures très différentes qui leur permettent de bien fonctionner dans leurs conditions d'éclairement respectives. On distingue les **feuilles de lumière** et les **feuilles d'ombre**.

Les feuilles de lumière sont plus épaisses, et ont des cellules agencées de façon plus compacte ; au total, elles possèdent plus de chlorophylle par unité de surface. Elles capturent donc très bien un rayonnement intense. Par contre, elles ont un coût énergétique de maintenance très élevé (respiration intense), qui ne leur permet pas d'être efficaces si elles sont placées à l'ombre.

Les feuilles d'ombre, quant à elles, sont minces, ont des cellules plus lâchement agencées et possèdent moins de chlorophylle par unité de surface. Au total, elles respirent très peu, ce qui leur permet d'avoir un bilan d'énergie positif même si l'intensité lumineuse est faible. Par contre, leur pauvreté en chlorophylle ne leur permet pas de fonctionner très bien en pleine lumière.

## Adaptations des plantes à un excédent d'énergie solaire

Dans les climats très ensoleillés, une plante peut dissiper une partie importante de l'énergie qu'elle reçoit par la **transpiration** (chaleur latente d'évaporation).

Si l'eau est limitante (climat sec), d'autres mécanismes entrent en jeu :

- réduction ou disparition des surfaces foliaires ; le cas extrême est celui des cactus, dont l'appareil aérien est réduit à des cylindres verticaux qui interceptent très peu de rayonnement au moment où le soleil est au zénith
- structures réfléchissantes sur les feuilles : poils, écailles,...
- feuilles profondément découpées, plus faciles à refroidir par le vent que des feuilles indivises (à surface égale).

## Adaptations des plantes aux climats froids

Dans les climats arctiques et alpins, beaucoup de plantes ont développé des mécanismes qui limitent les **pertes de chaleur par convection** (vent) :

- **port en coussinet** : l'effet refroidissant du vent ne se manifeste qu'à la surface du coussinet et très peu au niveau de chaque feuille,  
ex. : saxifrages, androsaces,...
- **poils** : ces poils emprisonnent autour des feuilles une couche d'air calme.

Certains dispositifs peuvent favoriser le réchauffement de certaines parties de la plante quand elle est exposée au soleil :

- bractées translucides de certaines rhubarbes de l'Himalaya, constituant une « serre » au tour de la tige,
- corolle bleu vif, en entonnoir, des gentianes, assurant le réchauffement de l'ovaire.

## En guise de conclusion

Le fonctionnement d'un écosystème dépend de son approvisionnement en énergie par les plantes. A l'exception des écosystèmes manipulés par l'homme (agroécosystèmes), les écosystèmes ne conservent généralement pas l'énergie qui y pénètre. Généralement, cette énergie est complètement dissipée sous forme de chaleur.

L'évolution a optimisé la capacité des plantes à capturer la lumière. Cette optimisation se manifeste, d'une part, au niveau de l'architecture de la plante entière, d'autre part, au niveau de l'anatomie foliaire. Néanmoins, l'efficacité de la photosynthèse reste faible (< 5 %).

Enfin, dans les climats très ensoleillés et secs et, à l'opposé, dans les climats très froids, le maintien de l'équilibre thermique des plantes met en œuvre des adaptations caractéristiques, essentiellement de nature morphologique.

## Les végétaux ont la pêche !

Par Ariane Vlérick,

Infosciences

Faculté des Sciences

*Comme tout organisme vivant, la plante a besoin d'énergie pour se développer. Mais l'énergie dont elle s'alimente est de nature très différente de celle que nous trouvons dans notre assiette !*

*Par ailleurs, c'est un rôle capital qu'elle joue dans notre environnement, particulièrement sur le plan énergétique ! Mais quel est ce rôle ? En quoi est-il spécifique aux végétaux et, surtout, pourquoi l'est-il ?*

*C'est à ces questions que nous espérons apporter quelques éléments de réponse !*

Que les plantes soient des organismes «photosynthétiques» n'est probablement plus un secret pour personne. Qu'il y ait des rapports entre la photosynthèse et l'énergie, peut-être pas non plus. Mais lesquels? Et d'abord...

### Qu'est-ce donc que la photosynthèse ?

La **photosynthèse** est réalisée dans la nature par les **organismes phototrophes**, ou encore autotrophes, parmi lesquels comptent les algues, les plantes supérieures et certains types de bactéries. Par contre, les animaux sont qualifiés d'**organismes hétérotrophes**. "

« Pfffffffff ! Allons donc... Mais qu'est-ce encore que ce jargon?! 'Peuvent pas parler français comme tout le monde, ces scientifiques ? »

Et si... Et si nous cessions de râler un instant? Juste pour décortiquer, du bout des mots, ces deux phrases d'apparence complexe.

### Un peu de grec peut suffire à comprendre l'essentiel...

La **photosynthèse** signifie, littéralement, «construction (synthesis) à partir de lumière (phos, photos)». C'est donc la capacité que possède un organisme vivant à collecter et à exploiter l'énergie solaire pour la transformer en une forme d'énergie «utilisable»: une énergie chimique. Plus précisément, la photosynthèse décrit l'ensemble des processus par lesquels des composés organiques, assimilables par la plante (des sucres, dans un premier temps), sont élaborés - au niveau cellulaire - à partir de matières premières minérales telles que l'eau (H<sub>2</sub>O) et le dioxyde de carbone ou gaz carbonique (CO<sub>2</sub>). La plante puise l'eau par les racines et absorbe le dioxyde de carbone présent dans l'atmosphère au niveau des feuilles. Et ce n'est qu'en présence de lumière que l'étape initiale de la photosynthèse est concevable. C'est pourquoi, dans l'obscurité - la nuit par exemple -, les plantes consomment l'oxygène présent dans l'air ambiant et y rejettent du dioxyde de carbone, tout comme nous!: elles respirent. C'est la raison pour laquelle, à l'hôpital, les infirmières prennent la peine, à la tombée de la nuit, d'évacuer de votre

chambre les fleurs qui vous ont été offertes pour un prompt rétablissement. En plein jour aussi, les plantes respirent, mais leur activité photosynthétique est telle que le bilan global de la photosynthèse et de la respiration correspond à une consommation de dioxyde de carbone et à une production d'oxygène. Jusque-là, OK! Passons donc à la deuxième étape!

Pour qu'un organisme vivant puisse faire de la photosynthèse, il faut qu'il dispose d'un moyen de "capturer" la lumière. Et puisque cette lumière va lui servir, au bout du compte, à construire des substances chimiques nécessaires à sa croissance et à son développement, pourquoi ne pas le qualifier d'organisme «bouffeur de lumière»? Et bien, **phototrophe**, ce n'est rien d'autre que cela, puisque la nourriture se dit « trophè » en grec!

Phototrophe est parfois remplacé par **autotrophe**, parce que cette capacité à «vivre de lumière et d'eau fraîche» rend l'organisme photosynthétique totalement indépendant des autres : il se nourrit (trophè : la nourriture) « par lui-même » (auto).

Les animaux sont quant à eux incapables d'utiliser directement la lumière du soleil comme source d'énergie : sans leur casse-croûte, ils meurent. On les qualifie d'organismes **hétérotrophes** parce qu'ils ne peuvent survivre sans se nourrir d'autres (heteros) organismes vivants.

Alors... Est-il toujours indispensable de démontrer l'utilité d'étudier les «langues mortes»?...

Les différents termes qui viennent d'être introduits nous amènent tout naturellement à la notion de «chaîne trophique». Encore du grec ! Oui, mais le mot «trophè», on l'a déjà rencontré plusieurs fois, donc tout va bien ! La «chaîne trophique» - ou «chaîne alimentaire» - définit un ordre entre les divers organismes vivants, basé sur le «niveau alimentaire» de chacun d'eux. En gros, on peut dire qu'elle répond aux questions : «qui mange qui?» et «qui est mangé par qui?». Il ne faut pas être fin observateur pour constater que tout animal se nourrit soit de végétaux, soit d'animaux ayant eux-mêmes préalablement assimilé des végétaux. On perçoit donc clairement que, où que l'on se situe dans la chaîne trophique, la source ultime de toute l'énergie métabolique provient de la photosynthèse.

Imaginons un instant ce que nous dirait une plante si elle pouvait communiquer avec nous...

### L'énergie et la photosynthèse : le point de vue... d'une plante !

Vous ne niez sans doute pas que, dans votre langage, le verbe «végéter» a une connotation franchement péjorative! Si vous l'utilisez pour désigner l'activité de l'un de vos congénères, c'est que ce pauvre bougre va bien mal... qu'il manque sérieusement de vigueur, de «punch»... De même, si vous le traitez de «plante». Pourtant, contrairement à ce que vous semblez croire, nous, les végétaux, nous sommes loin de manquer d'énergie !... Et le rôle que nous jouons dans votre environnement est bien loin d'être négligeable... Encore faut-il, pour vous en convaincre, vous débarrasser de votre subjectivité ! Pas gagné...

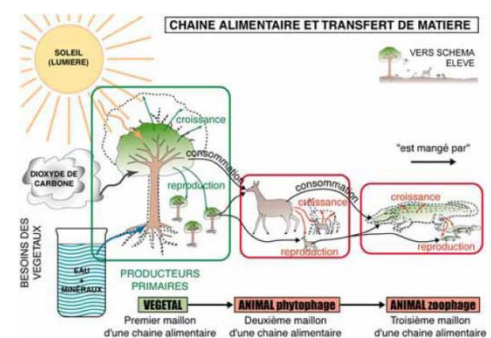


Image extraite du site de l'Académie de Besançon <http://artic.ac-besancon.fr/>

Pour certains d'entre vous, je ne suis finalement qu'un objet inanimé, car votre vision de la Vie est indissociable d'une propriété que vous partagez seulement avec les animaux : celle de vous mouvoir. Et oui ! Votre animal de compagnie bénéficie en général de bien plus de considération que votre petite plante verte de salon... Va savoir pourquoi, car celle-ci vous fait bien moins de dégâts ! J'imagine que c'est parce que le brave toutou et le mignon matou vous sont plus proches, plus semblables dans leur fonctionnement, plus «affectueux». Ceci dit, ce n'est pas parce que nous ne bougeons pas et que nous n'émettons aucun son que notre vie ne repose pas elle aussi sur l'énergie et la communication. A ce sujet, et si l'on ose sortir de vos schémas d'humains, on peut concevoir un dialogue muet. «Parler» avec des molécules?... Bien entendu ! et je vous plaindrais si vous me disiez que vous n'en avez jamais fait l'expérience... dans les circonstances les plus intimes qui soient !

Il y en a quand même certains qui nous bichonnent : ils prennent un malin plaisir à nous cultiver dans la perspective de recueillir de délicieux fruits et légumes, ou d'offrir un bouquet coloré à l'être qui leur est cher. Nous sommes alors appréciés pour notre contribution à votre bien-être, pour le service que nous vous rendons.

Certains vont même jusqu'à nous attribuer une certaine forme de «Volonté»<sup>[1]</sup> ou à s'interroger sur nos caractéristiques «humaines»<sup>[2]</sup>, sur nos goûts musicaux<sup>[3]</sup>. Plausible ou pas, là n'est pas la question.

Jamais vous ne me direz « je ne peux pas vivre sans toi ». Il est cependant évident que nous sommes totalement indispensables au développement et au prolongement de la vie sur Terre -la vôtre y comprise ! Il suffit par exemple de se rappeler qu'au sein des écosystèmes nous sommes les seuls organismes vivants à avoir un rôle de producteurs (voir le texte "**L'énergie dans l'écosystème**"). Les animaux se contentent de consommer ce que nous produisons.

Nous sommes capables de mettre en émoi nombre de vos sens : par exemple, votre goût lorsque vous vous délectez d'un fruit juteux ; votre vue lorsque vous vous émerveillez devant la beauté d'une fleur ; votre odorat lorsque notre parfum délicat vous enivre. Parfois même, c'est dans notre piège d'ensorcellement, de dépendance que vous tombez. D'ailleurs, celui d'entre les hommes qui a appris à percer nos mystères et à les utiliser intelligemment s'est doté tout autant d'un pouvoir de guérison hors pair que de pouvoirs maléfiques envers ses semblables.

Mais si nous vous sommes si indispensables, c'est bien moins pour nos fruits et nos fleurs que pour nos feuilles et nos tiges. Car bien avant de pouvoir jouir ou souffrir de notre présence dans votre environnement, il vous faut respirer... Or, c'est au niveau de nos parties vertes, exposées à la lumière, que s'effectuent les réactions qui mènent notamment à la production d'oxygène qui est libéré dans l'atmosphère. La photosynthèse est la seule voie par laquelle se régénère l'oxygène présent dans l'air que vous consommez au cours de la respiration et de la combustion d'énergie fossile.

Peut-être vous demandez-vous pour quelles raisons nous faisons de la photosynthèse alors que vous en êtes incapables ?

*Toi, tu ne pourrais même pas être un légume : même un artichaut a du coeur*  
Le fabuleux destin d'Amélie Poulain

*Il me semble que nous ne jugeons jamais des choses que par un retour secret que nous faisons sur nous-mêmes. (...) On a dit fort bien que, si les triangles faisaient un dieu, ils lui donneraient trois côtés.*  
Montesquieu

*Déjà Aristote attribuait aux hommes et aux animaux comme aux plantes une «âme végétative», aux hommes comme aux animaux une «âme sensitive», reconnaissait aux hommes seuls une «âme intellectuelle».*  
Philosophie - Penser par soi-même, ouvrage réalisé sous la direction de Bernard Michaux, Messidor, éditions sociales, Paris, 1986.

<sup>[1]</sup> De la volonté dans la nature - chapitre Physiologie végétale, Arthur Schopenhauer, (Quadrige / Presses Universitaires de France, 1969).

<sup>[2]</sup> Voir les nombreux ouvrages de Jean-Marie Pelt, dont Évolutions et sexualité des plantes (Horizons de France, 1970), Les Plantes : Amours et civilisations végétales (Fayard, 1980), La Prodigieuse aventure des plantes avec J.P. Cuny (Fayard, 1981), La Vie sociale des plantes (Fayard, 1984).

<sup>[3]</sup> Visiter par exemple le site [www.multimania.com/jardmontoiseaux/musique.htm](http://www.multimania.com/jardmontoiseaux/musique.htm)

La réponse est simple : nos cellules ont une structure plus complexe que celle des vôtres (voir image comparative). Notre activité photosynthétique s'effectue en effet au sein des différents compartiments d'un organite de couleur verte que vos cellules ne possèdent pas<sup>[4]</sup> et qui porte le nom de **chloroplaste**. Nos chloroplastes ont la particularité d'être riches en pigments, particulièrement en **chlorophylles**. Par leur structure moléculaire, les chlorophylles sont capables d'absorber de la lumière. Et comme les pigments possèdent la couleur des radiations qu'ils n'absorbent pas, la chlorophylle vous apparaît verte, sous l'éclairage envoyé par le Soleil, parce qu'elle absorbe les radiations complémentaires du vert, c'est-à-dire essentiellement du rouge.

Jugez par vous-mêmes de notre efficacité...

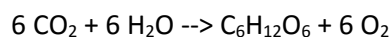
Alors que le dioxyde de carbone ne représente pour vous qu'un vulgaire déchet de la respiration, c'est environ 120 milliards de tonnes de ce gaz que nous convertissons chaque année en substances organiques grâce à nos chloroplastes.

Certaines de vos sources d'énergie (comme le charbon, le gaz naturel et le pétrole) sont des produits de décomposition d'organismes terrestres ou marins (végétaux ou animaux) qui renferment une énergie d'origine « extraterrestre », issue de radiations solaires qui ont été capturées il y a des millions d'années, toujours par les organismes photosynthétiques !

### Comment fonctionne la photosynthèse ?

Considérons la plante comme une « boîte noire », une machine qui, alimentée en eau et en dioxyde de carbone, est capable de produire de l'oxygène moléculaire, gazeux (O<sub>2</sub>). La mise en route de la machine nécessite bien évidemment un apport d'énergie, qui se présente ici sous forme de lumière. Dans ces conditions, le "rendement de la machine" est tel qu'il y a autant de molécules d'oxygène (O<sub>2</sub>) formées que de molécules d'eau (H<sub>2</sub>O) et de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) consommées.

Au bilan, on a :



Une partie des sucres formés (C<sub>6</sub>H<sub>12</sub>O<sub>6</sub>) est utilisée pour la croissance et le développement de la plante tandis qu'une autre est stockée sous forme d'amidon, pour une utilisation future.

La quantité d'énergie nécessaire à l'alimentation de la machine dépend des performances du système qui lui permet de capter la lumière : l'énergie lumineuse incidente est en effet convertie en des proportions variables d'énergie chimique, d'énergie de fluorescence et d'énergie calorifique. Seule la forme chimique est utile dans le cadre de la photosynthèse. Si l'on compare le système de capture de l'énergie lumineuse à un pluviomètre et la pluie à un flux de photons, on peut assimiler la chaleur à une perte d'eau par ruissellement, l'émission de fluorescence à une fuite, et enfin l'énergie chimique à l'eau collectée efficacement dans le pluviomètre.

<sup>[4]</sup> A noter que les algues possèdent aussi des chloroplastes et qu'il existe des bactéries photosynthétiques, appelées cyanobactéries.



Au cours de l'évolution mais aussi au cours de leur propre existence, les plantes s'adaptent à toutes sortes de conditions extrêmes que l'on qualifie d'« états de stress »... Il s'agit, par exemple, de la sécheresse, du froid, des faibles et fortes intensités lumineuses. Dans le cas de la photosynthèse, des chercheurs ont mis en évidence, au niveau du système de capture de la lumière, une série de mécanismes développés par les plantes afin de s'adapter aux grandes variations d'intensité lumineuse auxquelles elles sont parfois soumises.

La compréhension du fonctionnement de la photosynthèse retient l'attention de chercheurs de tous bords. C'est en effet l'exemple même du sujet de recherche dont les connaissances ne peuvent progresser que par la mise en commun de données nouvelles issues de l'ensemble des disciplines scientifiques.

A l'heure actuelle, on connaît bien la **structure du chloroplaste** et de ses divers compartiments, sans pour autant pouvoir identifier l'ensemble des « acteurs moléculaires » présents au sein de cet organelle cellulaire végétal et, surtout, attribuer à la fois une structure et une fonction à chacun d'entre eux. On sait que la photosynthèse se déroule en **deux grandes étapes** : l'une qui nécessite la présence de lumière, l'autre pas. L'analyse détaillée des **réactions primaires et secondaires de la photosynthèse** a fait l'objet de plusieurs décennies de recherche.

Au baromètre des **Prix Nobel**, le chloroplaste -et particulièrement la production d'énergie en son sein- a d'ailleurs la cote ! Et il l'aurait probablement encore plus si l'attribution de ces prix avait débuté avant l'an 1901...

Avant que la lumière du Soleil nous échappe, ne croyez-vous pas qu'il soit grand temps de « cultiver notre jardin » ?

## Références :

La complexité de la photosynthèse est telle qu'il serait illusoire de vouloir ici tout expliquer des connaissances actuelles. Des livres entiers sont consacrés au sujet ! Voici deux références que je conseille particulièrement :

**La photosynthèse**, Henri Jupin et André Lamant, Masson, Enseignement des Sciences de la Vie, Paris, 1997

La plupart des chapitres est accessible à toute personne qui dispose d'un minimum de connaissances en biologie cellulaire et... aspect non négligeable !... : le texte est écrit en français !

**Photosynthesis** (sixth edition), D.O. Hall et K.K.Rao, Cambridge University Press, Studies in Biology, 1999

Ce livre balaie agréablement les connaissances en matière de photosynthèse, des bases jusqu'à la présentation des recherches actuelles.

## Comment notre alimentation influence-t-elle l'augmentation de la taille entre les générations ?

*Par Martine Vercauteren et Yvan Lepage,  
Laboratoire d'Anthropologie  
Faculté des Sciences*

*Comme dans tous les pays industrialisés, on observe en Belgique un accroissement considérable de la taille et du poids des individus depuis les années 1900, ainsi qu'une puberté de plus en plus précoce. Parmi les nombreux facteurs évoqués pour expliquer cette évolution, on retrouve plus particulièrement une alimentation meilleure (tant en qualité qu'en quantité) et la disparition des problèmes de carence. Ainsi, en Belgique, on constate des modifications de l'apport nutritionnel : augmentation de la ration calorique globale, consommation supérieure de sucres raffinés, de lipides d'origine animale, et surtout de protéines animales (viandes). D'autre part, nous pensons que l'introduction d'aliments variés dans le menu quotidien des nourrissons, et ce de plus en plus tôt, pourrait jouer un rôle dans l'accélération du développement des jeunes enfants.*

L'étude des facteurs de croissance des individus revêt une importance particulière, tant pour le praticien désireux de s'enquérir de l'état de santé d'un enfant que pour le chercheur souhaitant disposer d'un indice global de santé d'une population. Une telle étude se doit de prendre en compte non seulement les facteurs héréditaires mais également l'influence de l'environnement. C'est à ce dernier aspect que nous allons nous intéresser ici, en particulier à l'influence (qualitative et quantitative) de l'énergie que nous ingérons au cours de nos repas.

Depuis plus d'un siècle, on a constaté que tant les adultes que les enfants se montraient sensiblement plus grands à chaque génération, et cela dans la plupart des pays industrialisés (Europe occidentale, Etat-Unis, Japon,...). Par rapport aux sujets d'il y a 100-120 ans, les différences varient entre 5 et 15 cm, voire davantage dans certaines tranches d'âge (comme l'adolescence). Si l'on considère les adultes belges sur une période globale de 100 ans, on estime l'accroissement moyen à 1cm/décennie.

Dans ce processus, appelé **évolution séculaire positive**, on distingue deux composantes : l'augmentation réelle de la taille adulte et l'accélération du rythme de croissance. Cette accélération explique que les différentes étapes qui jalonnent le développement sont de plus en plus précoces. En effet, l'âge de la puberté a baissé de 2 à 3 ans : aujourd'hui, les filles ont leurs premières menstruations en moyenne à 13 ans, alors que cet événement se produisait entre 15 et 16 ans au 19<sup>ème</sup> siècle. Aussi, la taille adulte est atteinte bien plus tôt de nos jours (19-20 ans chez les garçons) qu'au 19<sup>ème</sup> siècle où la croissance n'était pas encore totalement terminée à l'âge de 25 ans.

Parallèlement à la stature, on observe, à chaque âge, une augmentation de poids.

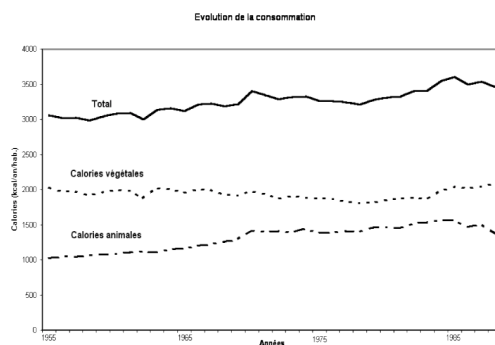
Il est bien démontré que le développement physique est très sensible aux facteurs socio-économiques et que l'évolution séculaire positive de la taille et de

la puberté est associée à de meilleures conditions de vie, en particulier de l'hygiène, des soins médicaux et de l'alimentation

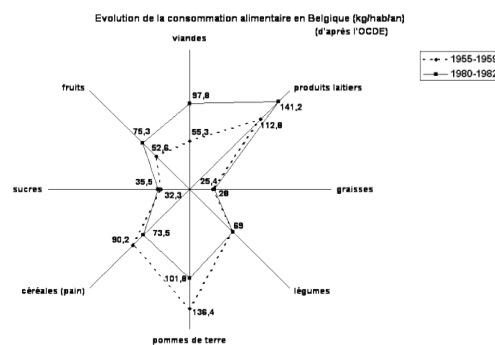
La part des ressources des ménages belges consacrée à l'alimentation à domicile a diminué, passant de plus de 30% en moyenne en 1961 à environ 20% à la fin des années 80. Ce fait traduit une amélioration générale des conditions de vie de notre population au cours de cette deuxième partie du 20<sup>ème</sup> siècle.

En outre, la majorité des pays industrialisés a modifié ses habitudes alimentaires et, même si ces changements sont loin d'être uniformes, on peut cependant noter quelques similitudes. On relève notamment une augmentation de la ration calorique globale, une diminution de la fraction calorique de source glucidique au profit de celle provenant de sucres raffinés, un accroissement de la consommation de lipides (plus particulièrement de lipides d'origine animale) et, enfin, une nette élévation de la quantité annuelle de protéines ingérées.

Globalement, on peut dire que la prise énergétique des Belges a augmenté de façon sensible depuis la période 1955-59 (voir figure ci-contre) : les chiffres révèlent une hausse de près de 15%, et ce essentiellement par le biais des produits d'origine animale. En effet, si les protides d'origine animale représentaient en 1955-59 environ la moitié de l'apport protéique total, en 1980-84, ils en couvrent près des deux tiers (une proportion qui reste stable d'après les derniers chiffres disponibles). Durant la même période, dans notre pays, la consommation en lipides a considérablement augmenté puisqu'on enregistre une hausse de 37%.



Le graphique ci-contre ("rose alimentaire") résume les transformations du régime alimentaire en Belgique au cours de la seconde moitié du 20<sup>ème</sup> siècle.



Il est bien difficile d'établir un lien réel entre les modifications de la nutrition et l'évolution séculaire. Si chacun s'accorde à reconnaître l'impact d'une meilleure nourriture sur le développement physique des jeunes, notamment dans la première partie du 20<sup>ème</sup> siècle (disparition des famines et apport journalier suffisant), le rôle important qu'on lui accorde encore aujourd'hui dans le processus d'évolution séculaire relève plus d'hypothèses que de preuves directes d'une association entre l'alimentation et la croissance.

Un recensement des études (peu fréquentes) consacrées à la relation entre la croissance des individus et leur alimentation dans les sociétés industrielles amène à suggérer que c'est surtout la qualité de la diète qui influence la croissance. Par exemple, les progrès réalisés dans la conservation des aliments permettent une qualité nutritive homogène durant toute l'année. Si l'on connaissait dans le passé d'importantes fluctuations saisonnières de croissance, elles ne sont actuellement pratiquement plus visibles, grâce à la constance dans l'apport vitaminique.

Plus précisément, mise à part une amélioration du niveau général de l'alimentation, peut-on supposer l'implication de certains aliments, de façon plus spécifique ?

Plusieurs nutriments sont invoqués pour tenter d'expliquer l'évolution séculaire des dimensions corporelles. Par exemple, les minéraux tels que le calcium et le

Université libre de Bruxelles - 2002 - INFORSCIENCES  
Sciences.be - la science à portée de clic !

phosphore jouent un rôle essentiel dans les processus de croissance : une carence en calcium limite la croissance osseuse, et donc l'élongation des os. Dès lors, la consommation accrue de produits laitiers ne peut que limiter ce risque et agir de façon positive sur la croissance. On a suggéré également une relation directe entre l'augmentation de la consommation de sucre et l'évolution séculaire de la stature. Les sucres raffinés fourniraient une énergie plus rapidement disponible pour la synthèse des protéines et la croissance. Enfin, la question des protéines est abordée maintes fois dans la littérature. On observe, en effet, un changement considérable dans les habitudes alimentaires puisqu'en 30 ans la consommation en protéines animales a pratiquement doublé. Une alimentation riche en protéines et en calories stimule, en effet, la croissance d'enfants appartenant à des groupes souffrant de malnutrition chronique, comme le sont certains groupes vivant dans des pays en voie de développement. Il semble cependant que l'on ait sur-évalué l'importance des protéines dans les programmes de suppléments alimentaires et que ce soit surtout l'apport calorique qui détermine une croissance satisfaisante dans la tranche d'âge critique de 1 à 5 ans. De plus, dans les pays industrialisés, l'apport quotidien en protéines semble plus que largement fourni puisqu'on estime que les jeunes Américains, par exemple, consomment en moyenne entre 2 et 4 fois plus de protéines par unité de poids que les taux requis pour une croissance optimale.

N'oublions pas non plus que l'augmentation de la consommation de calories accompagnée d'une réduction des activités physiques peut mener à un déséquilibre de la balance énergétique et faire apparaître non pas des bénéfices en termes de santé mais au contraire des problèmes d'obésité, eux-mêmes associés à un risque accru de morbidité (diabète de type II, hypertension, accident vasculaire cérébral, certains cancers,...). L'augmentation du nombre de personnes obèses constitue d'ailleurs un souci majeur de santé publique dans nos sociétés modernes.

Dans le processus d'évolution séculaire, nous constatons aussi que, dès l'âge de 3-4 ans, l'élévation de stature au cours des décennies est évidente : à 3 ans, les enfants d'aujourd'hui présentent la taille des enfants de 5 ans du 19<sup>ème</sup> siècle, soit une augmentation staturale d'environ 13 cm ! C'est donc dès après la naissance, pendant les premières années de vie, que le processus d'évolution se manifeste. Si l'on considère plus particulièrement l'alimentation du nourrisson, on peut se demander si, à ce niveau déjà, des modifications alimentaires pourraient être retenues pour tenter d'expliquer cette évolution.

La petite enfance est une période critique et sensible à cause de la grande vitesse de croissance qui s'y produit. C'est d'ailleurs pendant la première année de vie que les besoins journaliers en énergie, exprimés en calories par kilo de poids du sujet, sont les plus élevés. On estime que l'énergie nécessaire à la croissance entre la naissance et le quatrième mois de la vie représente quelque 33% de la consommation énergétique. Ce pourcentage tombe à 7,4% entre 4 et 12 mois et à 1,5% entre 12 et 24 mois. La proportion requise pour la croissance est donc la plus grande après la naissance, elle diminue ensuite rapidement de telle sorte que seul un petit pourcentage de l'énergie consommée chaque jour

est nécessaire pour le développement physique proprement dit pendant l'enfance et l'adolescence.

Dans une enquête de 1970 menée aux Etats-Unis, les aliments solides représentaient 31% de l'apport calorique total des nourrissons de 3 mois, 38% chez ceux de 6 mois, 58% chez ceux de 9 mois et 64% chez ceux d'un an (voir référence \* ). Or, il était tout à fait inhabituel d'en donner aux enfants de moins de 1 an durant le 19<sup>ème</sup> siècle, et même dans la première partie du 20<sup>ème</sup> siècle. Comme tout pays industrialisé, la Belgique a montré le même comportement dans ce domaine. Nos enquêtes menées dans certaines provinces du pays montrent une introduction de plus en plus précoce d'aliments solides. En effet, à Bruxelles notamment, on observe que l'âge moyen auquel le nourrisson reçoit des aliments solides comme base alimentaire journalière (âge du sevrage) a baissé de 1 mois au cours des 10 dernières années. Même s'il est difficile de pouvoir incriminer tel ou tel type de nutriment, nous pensons que l'introduction d'aliments variés, autres que le lait, dans le menu quotidien des nourrissons, et ceci de plus en plus tôt, pourrait jouer un rôle dans l'accélération du développement des jeunes enfants.

## Références :

*Taille et poids des nouveau-nés et jeunes enfants en Belgique : Evolution séculaire et Alimentation.*

M. Vercauteren, 1991.

Bulletins et Mémoires de la Société d'Anthropologie de Paris, 3 : 225-240.

*Fats, sugar, animal proteins: a new way of life.*

C. Susanne & Y. Lepage, 1990.

Journal of Human Ecology, 1: 49-61.

*\* What are infants fed in the United States ?*

S.J. Fomon, 1975.

Paediatrics, 56: 350-354.

# L'énergie et le sport

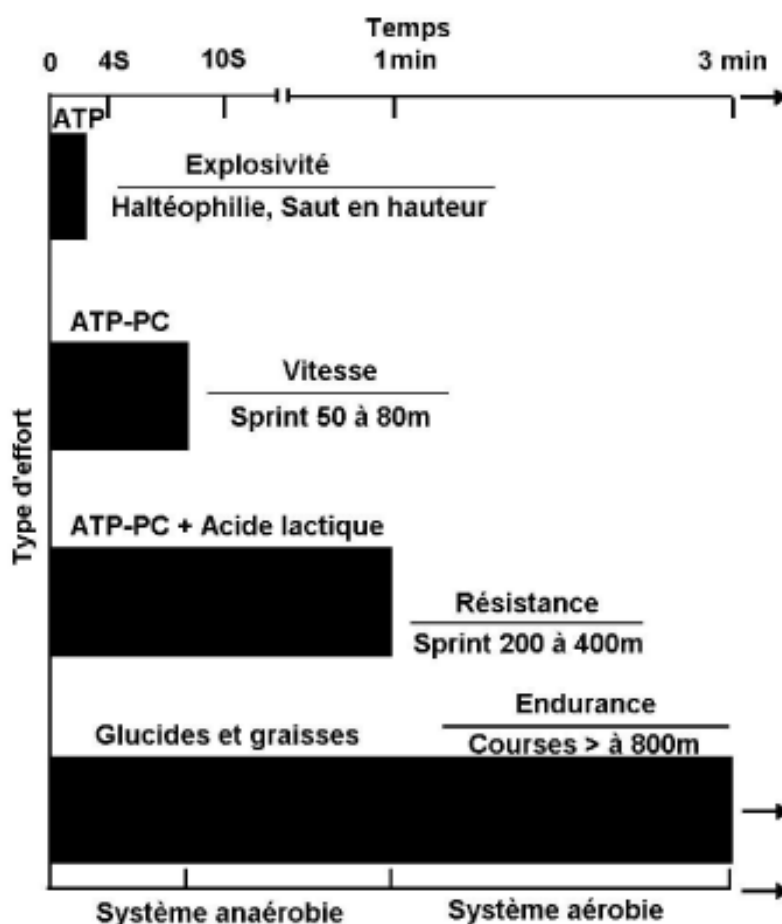
Par Alain Carpentier

Laboratoire de Biologie Appliquée et Unité de Recherche en Neurophysiologie

Institut Supérieur d'Education Physique et de Kinésithérapie (ISEPK)

La pratique sportive ou la réalisation d'un geste sportif entraîne une dépense énergétique dont le coût dépend essentiellement de la durée et de l'intensité de l'exercice. L'énergie nécessaire à la contraction du muscle est fournie par les aliments et stockée à l'intérieur de nos cellules par un intermédiaire à haute énergie, appelé adénosine triphosphate (ATP). Mais la concentration cellulaire de ce composé riche en énergie est faible et il apparaît donc nécessaire de le resynthétiser au fur et à mesure qu'il est dégradé. Trois processus interviennent pour assurer en permanence cette production cellulaire d'ATP : un processus anaérobie alactique, un processus anaérobie lactique et un processus aérobie. La contribution relative de chacun de ces systèmes dépend du type d'effort à fournir. Les exercices à très haute intensité font appel au métabolisme anaérobie tandis que les exercices de plus longue durée et d'intensité moindre puisent l'énergie nécessaire dans le métabolisme aérobie.

La réalisation d'une pratique sportive entraîne une dépense énergétique dont l'importance est fonction essentiellement de la durée et de l'intensité de l'exercice (cf. figure ci-dessous).



Contribution des différents processus énergétiques

Les muscles ne peuvent pas extraire l'énergie utile à leur contraction directement à partir des aliments. Nous disposons d'un intermédiaire entre l'énergie libérée par les aliments et l'énergie nécessaire à la contraction musculaire. Cet intermédiaire est un composé phosphoré : l'**ATP**, ou **adénosine triphosphate**, dont la rupture (hydrolyse) par l'enzyme ATPase libère l'énergie directement utilisable par la cellule musculaire pour sa mise en tension. Cet ATP est l'élément indispensable à la contraction musculaire et constitue en réalité le "réservoir" d'énergie cellulaire, dans lequel puise la cellule pour réaliser l'ensemble de ses activités. Mais la faible concentration de ce composé "riche en énergie" ne permet de réaliser qu'un exercice bref, comme une simple détente verticale. Il apparaît donc nécessaire de remplir ce "réservoir" au fur et à mesure qu'il se vide. Trois processus vont intervenir pour assurer en permanence la resynthèse de l'ATP : un **processus anaérobie alactique** (1), un **processus anaérobie lactique** (2) et un **processus aérobie** (3).

Chaque processus est caractérisé par :

- un **décal d'intervention**;
- une **capacité** (ou réserve totale d'énergie, exprimée en calories ou en Joules);
- une **puissance** (ou quantité maximale d'énergie libérée par unité de temps, exprimée en Watts);
- un **rendement** (ou pourcentage de l'énergie utilisée par rapport à l'énergie libérée).

Pour illustrer ceci par une image simpliste - mais somme toute assez proche de la réalité -, on pourrait dire que la capacité d'un sportif, pour un processus donné, correspond à l'autonomie d'une voiture, tandis que sa puissance pourrait être assimilée à sa vitesse de pointe et son rendement à sa consommation moyenne.

### Le processus anaérobie alactique:

Ce processus correspond au mécanisme de synthèse de l'ATP et donc d'apport énergétique en l'absence d'oxygène O<sub>2</sub> (**anaérobie**) et sans production d'acide lactique (**alactique**). Les cellules musculaires disposent de faibles réserves en ATP, mais d'importantes réserves en ADP (adénosine diphosphate) et en PC (phosphocréatine). Ces molécules sont capables en présence d'enzymes adéquates de "transférer" un P<sub>i</sub> (phosphate inorganique) d'une molécule à l'autre. Ce transfert, qui porte le nom de **transphosphorylation**, est très rapide et met rapidement de nouvelles molécules d'ATP à la disposition de la contraction musculaire.

- en présence d'une créatine-phospho-kinase (CPK)



- en présence d'une myokinase



Ces réactions de transphosphorylation sont facilitées par la diminution de la concentration intracellulaire en ATP et par l'augmentation (généralement concomitante) de la concentration en ADP. D'autre part, ces processus qui se déroulent presque instantanément sont d'une grande puissance (400 W/min chez le sédentaire et 750 W/min chez le sportif confirmé) et ont un rendement élevé ( $\pm 41\%$ ), mais sont d'une capacité très faible et ont une durée d'intervention maximale brève ( $\pm 7$  sec), limitée par l'épuisement des réserves intracellulaires en ADP et PC.

### Le processus anaérobie lactique

Dans le cas d'un effort maximal d'une minute environ, l'apport énergétique reste essentiellement anaérobie. En revanche, pour ce type d'effort, il y a une production élevée d'acide lactique au niveau musculaire. C'est la raison pour laquelle ces processus, qui contribuent à resynthétiser des ATP en dégradant du glucose, sans utilisation d'O<sub>2</sub>, mais en produisant de l'acide lactique, sont appelés **anaérobie lactique**.

Dans le muscle, le glucose est stocké sous forme de glycogène. La dégradation de ces molécules est catalysée par des enzymes spécifiques et peut se résumer de la manière suivante (cf. fig. ci-contre):

Le glucose, véhiculé par la circulation sanguine, pénètre dans la cellule musculaire en lui coûtant 1 ATP par molécule.

Dans le milieu intracellulaire, la molécule de glucose est transformée en glucose-6-phosphate et/ou stockée de manière réversible sous forme de glycogène.

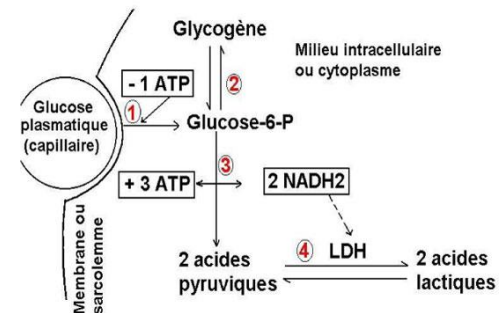
La molécule de glucose-6-phosphate est dégradée en 2 molécules d'acide pyruvique ce qui libère de l'énergie permettant de synthétiser 3 ATP.

En l'absence d'O<sub>2</sub>, les 2 molécules d'acide pyruvique se "transforment" en 2 molécules d'acide lactique en présence d'une lactico-déshydrogénase (LDH).

En anaérobiose, une molécule de glucose dépense 1 ATP pour pénétrer dans la cellule, puis se décompose en 2 acides lactiques, libérant ainsi de l'énergie pour synthétiser 3 ATP. Le bilan final est donc de 2 ATP. Ces processus, qui sont déclenchés dès le début de la contraction, ont un délai d'autant plus court que la baisse initiale d'ATP a été importante mais ne devient en réalité efficace qu'après 20 à 30 sec. C'est en réalité un système dont la puissance est liée à la capacité d'accumuler des lactates intracellulaires et donc au degré d'entraînement (puissance maximale de 200-250 W/min à 500 W/min chez le sportif entraîné). Cette puissance maximale peut être maintenue de la 30ème à la 50ème seconde. Le rendement de ces processus n'est que de  $\pm 26\%$ .

### Le processus aérobie

Lorsque l'intensité de l'effort diminue et que sa durée augmente au-delà d'une minute, l'approvisionnement énergétique se fait de plus en plus avec apport d'oxygène (aérobie). Ce processus mène à la synthèse des molécules d'ATP, en présence d'O<sub>2</sub> et à partir des substrats qui sont essentiellement les **glucides** (a) et les **lipides** (b), accessoirement les protides.



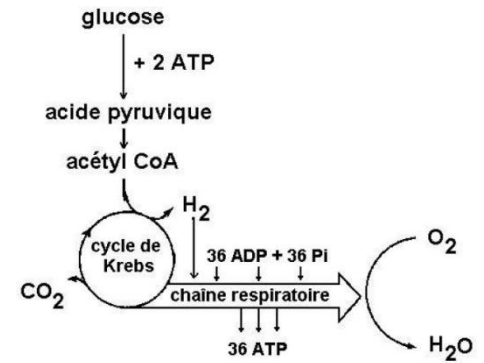
Représentation schématique des processus anaérobie lactique



## La glycolyse aérobie

En présence d'O<sub>2</sub>, l'acide pyruvique s'associe au CoA (coenzyme A) pour donner l'acétyl-coenzyme A (acétyl-CoA). Ce dernier est oxydé dans la mitochondrie, par un ensemble de réactions appelé **cycle de Krebs**, qui produit du CO<sub>2</sub> (gaz carbonique) et de l'H<sub>2</sub> qui, quant à lui, est fixé sur des "transporteurs" qui l'acheminent vers la chaîne des réactions respiratoires, où seront synthétisés les ATP (fig. ci-contre).

Le bilan final de la glycolyse aérobie, au départ d'une molécule de glucose, est de 38 ATP.

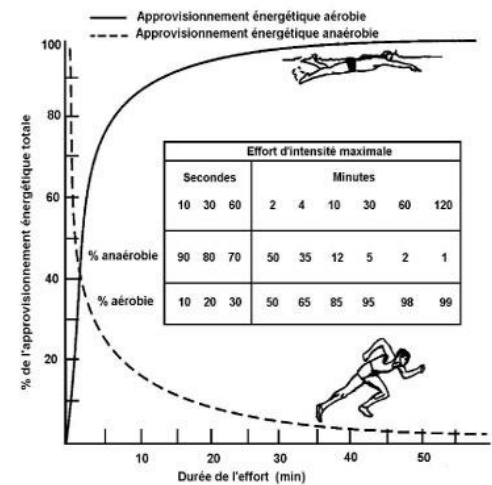


Représentation schématique de la glycolyse aérobie.

## La lipolyse

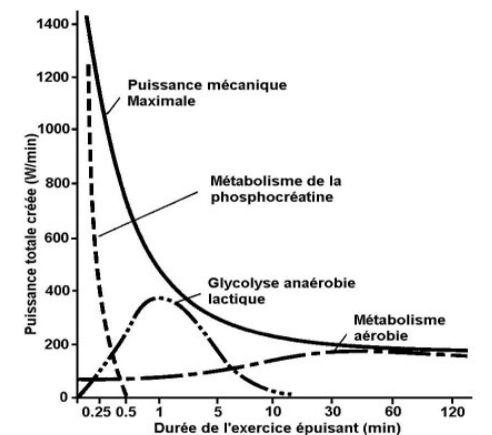
Le muscle utilise principalement les AGL (acides gras libres), provenant de la dégradation des triglycérides. Ces derniers se trouvent initialement dans le plasma, les tissus adipeux et dans les cellules musculaires. La dégradation des triglycérides donne 3 AGL et une molécule de glycérol. Ce dernier emprunte la voie de la glycolyse (fig.précédente). Les AGL sont quant à eux oxydés (β-oxydation) pour former l'acétyl-CoA qui est oxydé à son tour au niveau du cycle de Krebs. La quantité de molécules d'ATP produite est très élevée. En effet, la dégradation du glycérol produit 22 ATP et celle des 3 AGL en produit 441, ce qui fait un total de 463 ATP par molécule de triglycéride.

Ces processus (glycolyse aérobie et lipolyse), présents dès le début de l'effort, n'atteignent leur intensité maximale que lorsque le système cardio-respiratoire et circulatoire est complètement adapté à l'exercice (c'est-à-dire 1 à 3 min après le début de l'effort selon l'âge et le niveau d'entraînement). D'autre part, la puissance maximale du processus aérobie, qui est définie par la VO<sub>2</sub> max (consommation maximale d'oxygène) est limitée par les capacités maximales de transport et d'utilisation de la cellule (60 à 120 W/min suivant l'âge, le sexe, le niveau d'entraînement mais également liée aux facteurs héréditaires). La capacité de production d'énergie de ces processus est théoriquement illimitée dans la mesure où les réserves de glucides et de lipides sont quasiment inépuisables. Le rendement moyen de ces processus se situe à 25-26% selon les sujets et les facteurs cités précédemment.



Apport relatif des systèmes anaérobie et aérobie durant un effort physique maximal de durées différentes

La figure ci-contre explique le rapport entre les systèmes aérobie et anaérobie pour un effort maximal en fonction du temps. Il ne faut pas oublier que l'apport relatif des systèmes énergétiques est différent lorsque l'on ne fournit pas un effort maximal. Si l'on entame son effort par une course à allure calme, le système anaérobie est moins sollicité parce que l'intensité demandée est nettement moindre, ce qui a pour conséquence immédiate que l'on atteint rapidement un équilibre entre les besoins en oxygène et sa consommation. A ce moment, c'est le système aérobie qui reprend très rapidement à son compte la majeure partie de l'approvisionnement énergétique.



Diminution de la puissance mécanique maximale créée sur cycle ergomètre en fonction du temps et contribution estimée des apports énergétiques des différents processus.

D'autre part, l'enchaînement des processus de resynthèse de l'ATP en fonction de l'exercice est schématisé dans la figure suivante. L'avantage des métabolismes anaérobies est qu'ils ont une haute puissance de resynthèse de l'ATP, permettant la réalisation d'exercices à très haute intensité (vitesse et/ou force élevée) et donc demandant une puissance élevée. De plus, leur délai d'intervention est nul puisqu'ils ne requièrent pas d'oxygène et ne dépendent

Université libre de Bruxelles - 2002 - INFORSCIENCES  
Sciences.be - la science à portée de clic !

pas des délais d'ajustement des paramètres cardio-respiratoire et circulatoire.  
Par contre leur capacité totale est très faible.

En conclusion, la pratique sportive et indubitablement son entraînement ne se limitent pas à une analyse technico-tactique de la discipline mais requièrent de la part de l'entraîneur des connaissances physiologiques approfondies pour conseiller valablement les sportifs dont il s'occupe.

# L'élasticité d'une seule macromolécule mesurée à l'aide d'un microscope de force atomique (AFM)

Par Jean-Paul Ryckaert,

Laboratoire de Physique des Polymères

Faculté des Sciences

Tout comme l'élasticité d'un ressort permet d'amortir les chocs en convertissant de l'énergie cinétique d'une masse incidente en énergie potentielle interne, l'élasticité intrinsèque de certaines protéines est exploitée chez les êtres vivants pour réguler certains aspects du fonctionnement cellulaire. Cette découverte récente a été possible grâce à la possibilité de mesurer expérimentalement la loi d'élasticité d'une macromolécule unique (polymère, protéine) à l'aide de nouvelles techniques et notamment d'une application particulière de la technique de microscopie dite de force atomique (AFM). Dans ce texte, nous explicitons le concept de loi d'élasticité d'un polymère unique ainsi que sa mesure par AFM. En préambule, nous rappelons que l'élasticité des polymères se manifeste au niveau macroscopique dans les propriétés mécaniques du caoutchouc.

## Du caoutchouc à l'ADN (Acide Desoxyribo-Nucléique)

Lorsque vous étirez un morceau de caoutchouc ou un petit élastique courant, ceux-ci peuvent s'allonger facilement de deux ou trois fois leur longueur originale. Cette propriété provient de la nature particulière de ce matériau au niveau moléculaire. Il s'agit d'un réseau de polymères flexibles enchevêtrés, reliés les uns aux autres par des jonctions permanentes (=liaisons chimiques covalentes). A température ambiante, ces polymères sont très mobiles : l'état « caoutchoutique » s'apparente, assez curieusement, à un état liquide de la matière quant au niveau important de l'agitation moléculaire des macromolécules. Les ponts chimiques (comme par exemple les ponts di-sulfures dans le caoutchouc naturel vulcanisé) conduisent à un réseau (peu dense en points de jonction) qui assure la cohésion structurale de l'ensemble : d'une part le « liquide » ne coule pas, d'autre part, il garde la mémoire de la forme initiale du morceau de caoutchouc une fois que les forces externes cessent d'être appliquées. L'élasticité extraordinaire de ce type de matériau provient de ce que les brins élémentaires du réseau sont des polymères flexibles qui, dans l'état d'enchevêtrement mutuel qui les caractérise, ont initialement une structure de pelote qui peut être allongée facilement de façon importante en déroulant la pelote (voir figure ci-contre), ceci grâce à leur flexibilité interne qui résulte, au niveau moléculaire, de la rotation possible d'une partie de la macromolécule par rapport à l'autre autour de liaisons covalentes de leur squelette.

Si le matériau est soumis à ses extrémités à une force de traction progressive de plus en plus grande, il arrive un stade, bien avant toute rupture intrinsèque, où il devient nettement plus difficile de l'allonger encore de façon appréciable. Cela est dû à ce que certains brins de polymères ont acquis, suite à la déformation globale du matériau, une structure linéaire étendue où la distance entre les extrémités du polymère est proche de sa valeur maximale dite « longueur de contour  $L_c$  » (voir figure ci-contre).

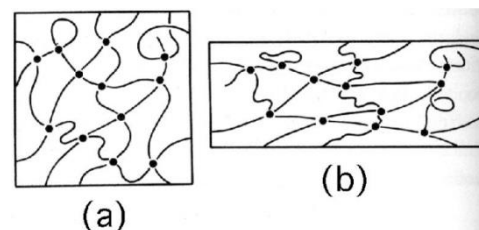


Figure 1 - Représentation schématique d'un réseau caoutchoutique : a) non contraint, b) soumis à une force de traction. On aperçoit les brins de polymères nettement plus étirés dans le cas (b) que dans le cas (a).

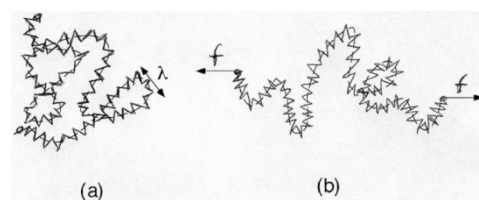


Figure 2 - Représentation d'un polymère flexible. La ligne de contour est représentée en pointillé. Cas (a), une conformation typique d'un polymère non contraint. Cas (b), conformation typique d'un polymère allongé suite à l'application de forces égales et opposées à ses extrémités. Dans le cas (a),  $\lambda$  représente la longueur de persistance du polymère (voir texte). La longueur  $L_c$  de la ligne de contour est la longueur du chemin en pointillé.

Dans ce texte, notre propos est de s'intéresser, non plus au caoutchouc, mais aux propriétés d'élasticité d'une seule macromolécule. Ce sujet est très étudié en recherche fondamentale aujourd'hui pour deux raisons différentes :

- a) Les physiciens ont réussi, depuis moins de 10 ans, à mettre au point diverses méthodes expérimentales permettant de mesurer directement la loi qui relie l'allongement d'une macromolécule unique à l'intensité des forces égales et opposées appliquées aux extrémités de celle-ci. La prouesse est également chimique car il faut attacher (greffer par un lien covalent) chaque extrémité de la macromolécule à l'agent extérieur à l'aide duquel la force de traction sera transmise au sein de la macromolécule.
- b) Les chercheurs en biologie moléculaire s'intéressent à un grand nombre de macromolécules biologiques spécifiques dont ils essaient de comprendre, pour certaines d'entre elles, leurs propriétés mécaniques. Le cas le plus étudié est l'ADN car la lecture des bases (code de l'information génétique) requiert l'ouverture des deux brins de la double hélice : ceci est notamment rendu possible dans les cellules par l'action de protéines spécifiques qui « tordent » ou « tirent » l'ADN localement afin de casser les liaisons entre bases conjuguées. Par ailleurs, de nombreuses protéines possèdent elles-mêmes des propriétés mécaniques spécifiques qui sont utiles à leur fonction (tels l'actine et la titine dans les muscles ou la ténascine sur les parois des vaisseaux sanguins,...). Ces aspects biologiques feront l'objet d'un second texte.

Dans le cas présent, nous resterons en dehors de tout contexte biologique afin de nous concentrer, dans un premier temps, sur la loi d'élasticité d'une macromolécule unique de type polymère, tant au niveau du concept lui-même que de sa mesure expérimentale. De façon générale, ce sujet est lié à l'énergie dans le sens que tirer sur une molécule demande du travail. Quand elle est étirée, une molécule a absorbé de l'énergie qu'elle stocke sous forme d'énergie potentielle comme le ferait un ressort !

### **Loi d'élasticité d'un polymère (le point de vue du physicien)**

Un polymère est une macromolécule de structure chimique régulière obtenue en polymérisant un grand nombre de fois un même monomère. L'exemple le plus simple nous suffira ici : le polyéthylène est un hydrocarbure de formule chimique  $\text{CH}_3-(\text{CH}_2-\text{CH}_2)_n-\text{CH}_3$ , où  $n$  est le degré de polymérisation qui est de l'ordre de 100 à 10000. Le nom de ce polymère vient de ce qu'il est synthétisé par la polymérisation linéaire de l'éthylène  $\text{CH}_2=\text{CH}_2$ .

Voyons comment se comporte, du point de vue physique, un polymère unique baignant au sein d'un solvant lorsqu'on exerce des forces égales et opposées à ses extrémités. La loi d'élasticité traduira la façon dont la distance bout à bout moyenne de ce polymère -soit  $R$ - va croître progressivement avec l'intensité de la force -soit  $f$ - exercée à ses extrémités.

Pour analyser la fonction  $f = g(R)$  ou la relation inverse  $R = h(f) = g^{-1}(f)$ , introduisons les trois variables physiques relevantes du modèle d'un polymère, à savoir  $L_c$ ,  $\lambda$ , et  $k_B T$ . Rappelons que  $L_c$  est la longueur de contour du polymère

soit, dans notre exemple, 0,254 nm (pour rappel, 1 nm = 1 10<sup>-9</sup>m = 0,001 mm) par monomère d'éthylène au sein du polyéthylène, ce qui conduit à  $L_c = 2540$  nm pour le cas où le degré de polymérisation est  $n = 10000$ . La longueur  $\lambda$  porte le nom de *longueur de persistance* : elle traduit la longueur, mesurée le long du contour du polymère, dont il faut se déplacer pour que, en moyenne, l'orientation locale du polymère (définie par l'orientation de la tangente au contour en un point) a « oublié » son orientation initiale (voir figure 2). Pour les polymères dits flexibles, semi-flexibles et rigides, on a respectivement  $L_c \gg \lambda$ ,  $L_c = \lambda$  et  $L_c \ll \lambda$ . Notons que  $\lambda = 0,7$  nm pour le polyéthylène, ce qui montre qu'il s'agit d'un polymère flexible. Enfin,  $k_B T$  est le produit de la température absolue  $T$  du liquide dans lequel baigne notre macromolécule par la constante fondamentale de Boltzmann (constante des gaz parfaits divisée par le nombre d'Avogadro)  $k_B = 1,38 \cdot 10^{-23}$  J/K (joules par degré Kelvin). L'énergie  $1/2 k_B T$  est l'énergie cinétique moyenne associée à un degré de liberté microscopique classique, traduisant le fait que la température absolue est une mesure de l'agitation moléculaire. Dans un liquide formé de petites molécules rigides,  $k_B T$  est de l'ordre de l'énergie de cohésion entre une paire de molécules, ce qui explique que des paires de molécules au sein d'un liquide s'associent et se défont continuellement. Cette image reste valable pour les polymères en phase liquide au niveau des fragments moléculaires qui forment la chaîne. Notons encore ici un point préliminaire important concernant la taille moyenne  $R_0$  d'un polymère flexible libre au sein d'un liquide, définie telle que  $R_0^2$  soit la moyenne du carré de la distance bout à bout du polymère qui, au sein du liquide, change perpétuellement sa conformation. Un calcul statistique montre que la taille moyenne est liée aux grandeurs introduites plus haut par la relation  $R_0 = (2\lambda L_c)^{1/2}$ , ce qui donne  $R_0 = 62$  nm dans le cas du PE de degré de polymérisation  $n = 10000$ . Remarquons que cela implique que la taille d'un polymère augmente avec  $n$  selon une loi où  $R_0$  est proportionnel à  $n^{1/2}$ .

A partir des trois paramètres,  $L_c$ ,  $\lambda$  et  $k_B T$ , on peut définir deux forces typiques. La force  $f' = k_B T / R_0$  est la force seuil qu'il faut appliquer pour observer un allongement plus important que l'allongement naturel d'équilibre  $R_0$ . La force  $f'' = k_B T / b$  où  $b = 2\lambda$  représente le seuil qu'il faut appliquer pour voir la structure locale se déformer appréciablement : ceci signifie qu'un élément de la chaîne de longueur  $b$ , qui se comporte comme un segment assez rigide au sein de la pelote, commence lui-même à être étiré ! Si l'on augmente progressivement la force  $f$  entre les limites  $f'$  et  $f''$ , le polymère se déroule de plus en plus. Pour un polymère étiré au sein d'un milieu approprié (càd un milieu solvant ? dont la description nous entraînerait trop loin ici), la relation entre  $f$  et  $R$  est linéaire si  $f' < f < f''$  et on démontre que le polymère se comporte comme un ressort avec une loi de type  $f = kR$  où la « constante de rappel » est  $k = 3k_B T / R_0^2$ . Pour  $f > f''$ , le polymère étant pratiquement déroulé, c'est le squelette de la chaîne qui, à son tour, commence à être étiré. Les angles de torsion (qui sont à la base de la flexibilité des polymères) vont réagir aux forces de tension internes en adoptant préférentiellement les conformations qui correspondent à une extension maximale du monomère au sein du squelette du polymère. Dans l'exemple du PE, cela se traduira par une proportion croissante de conformations en trans aux dépens des conformations gauche.

La figure 3 ci-contre représente schématiquement la loi d'élasticité d'une chaîne unique de type PE sous la forme  $f = g(R)$ . Remarquons que pour le PE, on a  $f' = 0,07$  pN (piconewton, soit  $10^{-12}$  N) pour  $n = 10000$  et  $0,7$  pN pour  $n = 100$  alors que  $f'' = 2,8$  pN. La constante de rappel effective du PE ( $n = 10000$ ) est de  $k = 3,2 \cdot 10^{-6}$  N/m. Quand on tire sur le PE de  $n = 10000$  avec une force croissante entre  $0,07$  et  $3$  pN, la distance bout à bout moyenne augmente de  $62$  à  $875$  nm alors que  $L_c = 2500$  nm. La figure 3 montre que la force augmente rapidement si on veut étirer le polymère au-delà de  $R = f''/k$ . On parle de la région  $f > f''$  comme la région de flexibilité finie du polymère car ce dernier cesse de se comporter comme un ressort ! L'énergie stockée dans un polymère étiré de  $R < f''/k$  est  $E = 1/2 k R^2$ , soit environ  $1 \cdot 10^{-18}$  J pour  $R = 875$  nm dans l'exemple du PE avec  $n = 1000$ . Au-delà de cet étirement, l'énergie (et donc le travail d'extension) augmente plus rapidement avec  $R$  comme on l'avait en fait implicitement remarqué au début de ce texte avec l'extensibilité du caoutchouc qui devient plus difficile au-delà d'une certaine limite.

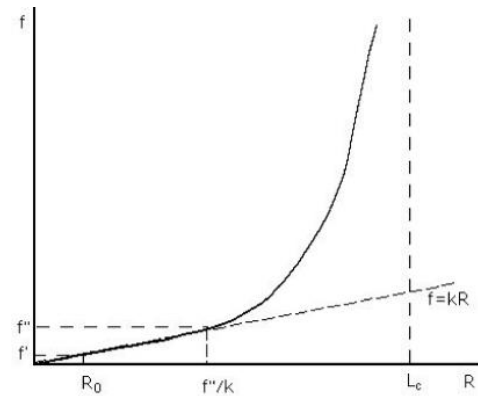


Figure 3 - Loi d'élasticité  $f = g(R)$  d'un polymère de synthèse.

### Le microscope de force atomique (utilisé pour déterminer la loi d'élasticité d'une macromolécule unique)

La technique décrite ici est une application très particulière du microscope de force atomique (AFM pour « Atomic Force Microscope ») dont l'invention remonte seulement à quelques 15 années environ et qui est actuellement utilisé selon différents modes opératoires pour étudier principalement des surfaces. La figure 4 montre les éléments importants de l'appareil ainsi que le dispositif utilisé pour mesurer l'élasticité d'une macromolécule. L'élément central est un micro-levier en forme de « V » qui se termine, sur sa face inférieure, par une pointe dont l'extrémité possède un rayon de courbure de quelques dizaines de nm. Les interactions entre cette pointe et les molécules tapissant ou formant la surface libre de l'échantillon vont créer une déflexion du micro-levier vers le bas (en cas d'attraction) ou vers le haut (en cas de répulsion). Cette déflexion est mesurée grâce à quatre photodiodes qui reçoivent une fraction du rayon laser réfléchi par le dos du micro-levier.

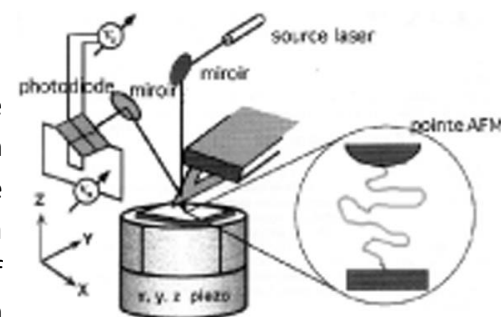


Figure 4 - Schéma d'un microscope de force atomique (voir texte).

En absence d'interaction, le rayon est initialement bien centré, et chaque quadrant (= une photodiode) reçoit la même quantité de lumière (nombre de photons par unité de temps). Toute déflexion vers le haut ou le bas du micro-levier sera détectée par un déséquilibre de la quantité de lumière reçue par les quadrants du haut et du bas. Afin de relier cette déflexion à une différence de hauteur absolue de la pointe, représentons la hauteur absolue (suivant la verticale) de la base de la pointe par  $z_{eq}$  en absence d'interactions et par  $z$  en présence d'une force (attractive pour  $z > z_{eq}$  ou répulsive pour  $z < z_{eq}$ ). La force appliquée au levier est alors donnée par  $f = k'(z - z_{eq})$  où  $k'$  est le coefficient de raideur du micro-levier. Cette constante (de l'ordre de  $0,1$  N/m) est obtenue à partir de la déflexion du rayon lumineux suite à un calibrage préliminaire.

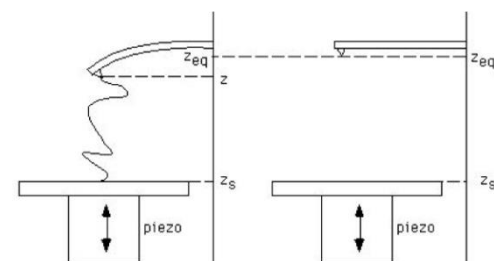


Figure 5 - Le coeur du système AFM illustré dans le cas qui nous occupe, avec les définitions des variables (la direction positive sur l'axe vertical est vers le bas). La position d'équilibre du levier est repérée par  $z_{eq}$ . La position du levier en présence d'une interaction entre la pointe et la surface est donnée par  $z$ . Enfin la position de la surface est donnée par  $z_s$ .

La position verticale de la surface, représentée par  $z_s$ , peut être modifiée pour approcher ou reculer la surface par rapport à la pointe, la distance  $d = z_s - z$ , étant donc la distance entre pointe et surface. La hauteur de la surface est actionnée par un cristal piézo-électrique situé sous la surface : un tel cristal est un monocristal dont les dimensions de la maille cristalline varient avec l'intensité du champ électrique imposé qui est sous contrôle de l'opérateur. Sur la figure 5 (à

gauche), une molécule unique est fixée avec une extrémité sur la pointe et l'autre sur la surface. On suppose généralement (ce qui est difficile à contrôler en réalité) que les points de greffage du polymère sur la pointe et sur la surface sont à la verticale l'un de l'autre ce qui implique qu'ils sont effectivement séparés selon  $z$  par la distance bout à bout  $R$  du polymère, soit  $R = d = z_s - z$ .

Les relations de base sont :

1) La loi d'élasticité de la macromolécule recherchée  $f = g(R)$  (1)

2) La loi d'élasticité du micro-levier  $f = k' (z - z_{eq})$  (2a)

que l'on peut réécrire  $f = -k' R + k' (z_s - z_{eq})$  (2b)

Les équations (1) et (2b) doivent en fait être simultanément satisfaites pour une valeur particulière de la position  $z_s - z_{eq}$ , contrôlée par le cristal piezo-électrique.

La figure 6 représente la résolution graphique de ce système de deux équations à deux inconnues pour  $(z_s - z_{eq})$  fixé. La courbe représentant la loi  $f = g(R)$  typique d'un polymère de synthèse a été discutée dans le paragraphe II (voir figure 3). La relation 2b est une droite  $f = aR + b$  dont la pente est  $a = -k'$  et l'ordonnée à l'origine  $b = k' (z_s - z_{eq})$ . L'ordonnée à l'origine peut s'interpréter comme la force nécessaire pour plier le levier de telle sorte que la pointe soit au niveau de la surface, en absence de toute interaction avec celle-ci. Par ailleurs, cette droite coupe l'axe des abscisses en  $R = (z_s - z_{eq})$ . Le point recherché est donné par l'intersection des deux courbes, soit la paire  $\{f^*, R^*\}$  indiquée sur la figure 6. En consultant les valeurs sur l'axe des abscisses, on constate, en accord avec les relations 2a et 2b, que la distance imposée  $(z_s - z_{eq})$  est décomposée en deux parties, soit la longueur bout à bout  $R^*$  du polymère et la déflexion du levier  $(z - z_{eq}) = f^*/k'$ . Lorsque la distance imposée  $(z_s - z_{eq})$  est modifiée par l'opérateur, la droite de pente constante ( $a = -k'$ ) se déplace parallèlement à elle-même et le dispositif expérimental fournit en principe les points  $\{f, R\}$  de la courbe.

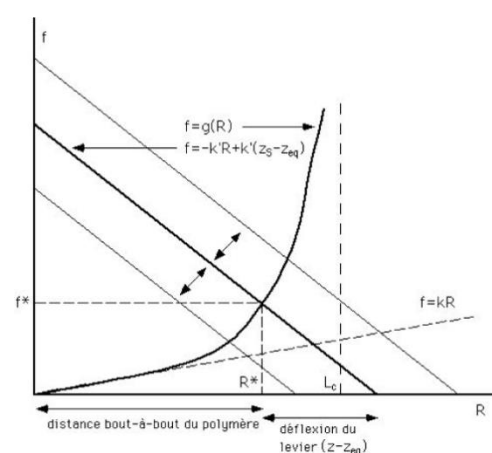


Figure 6 - Illustration des relations (1) et (2b) dans le cas d'un polymère de synthèse.

Expérimentalement, on ajuste  $z_s$  (contrôlé avec une précision finie  $Dz$ ) et on mesure  $f^*$  avec une précision  $Df$ . Sur base de ces mesures, on tire une estimation de  $R^*$  à partir de l'équation 2b. Il faut savoir que  $k'$  est au minimum de 0,01 N/m, ce qui est toujours nettement plus grand que la constante de rappel effective du polymère  $k$  (notion valable dans la région  $f < f''$ ) qui est de l'ordre de  $1,0 \cdot 10^{-5}$  N/m. A 300 K, avec un levier de constante de raideur  $k' = 0,1$  N/m, on peut montrer qu'un bruit (dû à l'agitation thermique affectant le microlevier) d'amplitude  $A = 0,2$  nm affecte la valeur de  $z$ , ce à quoi correspond une incertitude de  $Df = 20$  pN. Comme la force  $f''$  qui fait la transition entre domaine linéaire et domaine de flexibilité finie (voir figure 3) est de 3 pN, on se rend compte que l'AFM ne pourra être utilisé que pour mesurer la région dite de flexibilité finie de la loi d'élasticité.

La figure 7 donne un exemple de courbe expérimentale obtenue dans le cadre de l'étirement d'un polymère. Dans cet exemple,  $z_f$  en ordonnée représente une mesure proportionnelle à la force, soit  $z_f = -(z - z_{eq})$  alors qu'en abscisse,  $z_p = z_s - z_{eq} + C$  où  $C$  est une constante (voir sens physique plus bas), donne la déflexion globale du système total « levier + macromolécule en série ». La courbe en gris clair représente la courbe d'approche où la pointe se rapproche de la surface sur Université libre de Bruxelles - 2002 - INFORSCIENCES Sciences.be - la science à portée de clic !

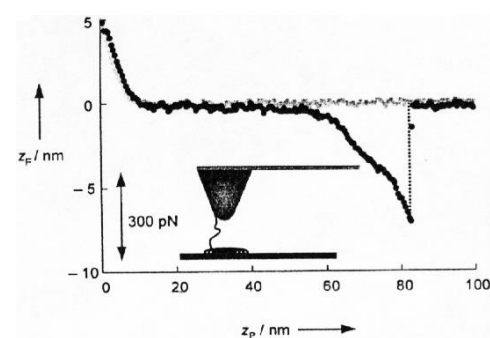


Figure 7 - Exemple de résultat expérimental de mesure d'élasticité d'un polymère unique (tiré de l'article de revue « Force spectroscopy of molecular systems-Single molecule spectroscopy of polymers and Biomolecules » by A. Janshoff et al., Angew. Chem. Int. Ed. (2000), 39, 3212-3237). La courbe mesurée expérimentalement peut se ramener à la courbe  $f = h(d)$  moyennant une transformation discutée ci-contre.

laquelle est greffé le polymère. Le contact direct pointe-surface s'établit et la pointe (+ levier) s'élève vu la répulsion qu'exerce sur elle la surface dure ( $z_F > 0$ ). Lorsque le cristal piezo-électrique commande à la surface de s'éloigner à nouveau de la pointe, il s'est produit une adsorption physique du polymère sur la pointe (voir dessin explicatif dans la figure 5) et l'appareil, en mesurant la courbe de rétraction de la pointe, teste à présent la force d'attraction entre la pointe et la surface résultant du pont flexible provenant du polymère (courbe en noir). On observe sur la courbe de rétraction que lorsque  $z_P$  atteint 80 nm, la force de 500 pN devient suffisamment importante pour détacher le polymère de la pointe qui redevient libre. La constante  $C$  permet en fait de définir la position absolue de la surface, plus exactement le point d'ancrage du polymère sur la surface : ce point est délicat car, quand on travaille au niveau microscopique, le concept géométrique d'une surface plane à l'interface de l'échantillon et du solvant environnant est mal défini. La situation est en fait rendue très complexe car il y a des interactions atome-atome de tout ordre (attractives et/ou répulsives) quand il y a contact direct entre pointe et surface. Dans le cas de la figure 7, on peut faire l'hypothèse simpliste que le cas  $z = z_{eq}$  correspond au cas où la surface est à hauteur  $z_s = z = z_{eq}$ . Sur la figure 7, cela se produit pour  $z_P = 10$  nm, ce qui fixe  $C$  à cette même valeur.

En pratique, la technique exposée permet donc d'étudier la loi d'élasticité de polymères de synthèse ou de molécules biologiques dans la partie correspondant au domaine dit d'extension finie (non linéaire). Pour étudier la loi d'élasticité de macromolécules uniques à plus faible force, il faut recourir à d'autres techniques où la macromolécule est greffée à une extrémité à une surface et à l'autre à une bille (de l'ordre du micron), éventuellement magnétisée, que l'on manipule avec des pinces optiques (faisceau laser) ou magnétiques (champ magnétique).

## Conclusions

Dans ce texte, nous avons vu qu'il est devenu possible de manipuler des macromolécules uniques afin de tester leur élasticité interne. L'intérêt immédiat des mesures discutées ici est de les comparer aux prédictions théoriques relatives à l'élasticité des polymères (modèle de chaîne à articulations souples ou de type « ver de terre »), sujet que nous n'avons pas abordé ici.

L'intérêt primordial de ce type de mesure sur les polymères est de mettre au point une technique permettant d'aller plus loin encore en étudiant des molécules d'intérêt biologique dont la structure interne peut être révélée par des mesures mécaniques directes. Par ailleurs, on étudie même aujourd'hui des réactions chimiques spécifiques au sein d'un double brin d'ADN unique en suivant les modifications de longueur de la molécule induites par la réaction. Pour ceux qui voudraient en savoir plus, nous citons à la fin du texte deux références récentes qui donnent un aperçu de la révolution dans l'instrumentation des micromanipulations et son impact en biologie.

L'AFM dont il a été fait état ici est un instrument dont l'utilisation ne cesse d'être raffinée et étendue. Notre laboratoire en Faculté des Sciences (Physique des Polymères) en possède un exemplaire avec four thermique permettant d'étudier des surfaces de matériaux en fonction de la température. Le



laboratoire sera accessible aux personnes intéressées, sur rendez-vous (02/650 5732 le matin) durant la période du Printemps des Sciences.

### Remerciements

Je tiens à remercier mes collègues Marc Baus et Dimitri Ivanov pour leurs suggestions et conseils dans l'élaboration de ce texte.

### Références :

«Force spectroscopy on single passive biomolecules and single biomolecular bonds»,

R. Merkel, Physics Reports (2001) 346, 343-385.

«The manipulation of single biomolecules»,

T. Strick, J.-F. Allemand, V. Croquette, D. Bensimon, Physics Today (2001), 54, 46