

L'idée de ce cours est découvrir ce que peut bien nous raconter une équation lorsqu'on la soumet à la question. Le choix de l'équation m'est apparu vite évident : elle devait être suffisamment simple dans son énoncé, plutôt connue et de préférence faisant appel à des connaissances qui ont été de près ou de loin introduites lors de mes deux cours des années précédentes.

# Pourquoi $E = Mc^2$ ?

Yves Schutz

Nous allons donc parler de, ou plutôt faire parler, l'équation  $E=mc^2$  ... que celui qui n'a jamais entendu parler ou vu cette équation lève le doigt. Connue certes, mais est-elle pour autant comprise ? C'est ce que nous allons voir au cours des 5 sessions de ce cours.

Selon mon habitude, le cours suivra un chemin pseudo-chronologique qui permet le mieux, à mon avis, de comprendre comment et pourquoi les concepts, les idées et les lois sont introduits en sciences.

# Pourquoi $E = Mc^2$ ?

E comme Énergie

Aujourd'hui, dans ce premier épisode, interrogeons donc l'équation pour savoir ce qu'est E, E comme énergie, redoutable question comme vous allez pouvoir en juger.

# Énergie

Ce mot énergie, mot plurivoque, est omniprésent dans notre vocabulaire. On peut être plein d'énergie ou sans énergie, on peut agir avec l'énergie du désespoir, ou refuser avec la dernière énergie, on peut s'exprimer avec énergie. L'énergie est alors synonyme d'élan, de vitalité, dynamisme, force, puissance. Le vocabulaire commun fait ainsi d'énergie, de force et de puissance des synonymes, alors que ces mots ont en physique chacun une signification différente.

Restons donc au plus près de la physique pour constater d'abord qu'en à peine deux siècles l'énergie a colonisé notre quotidien. Elle facilite les transports (29%), alimente l'industrie (19%), nous procure du confort(31%). L'actualité nous rappelle que l'énergie pose problème dès que l'on en manque ou au contraire en abuse. On doit alors faire face des problèmes économiques, sanitaires, géopolitiques, technologiques, écologiques. Ne passe un jour sans qu'on nous parle de transition énergétique, d'énergies fossiles ou d'énergies renouvelables, de bilan d'énergie avant de se lancer dans la construction d'un bâtiment à énergie positive, sans oublier les factures et fractures énergétiques.

Les physiciens quant à eux nous emmènent dans le bizarre avec leur jargon opaque, quand ils prétendent que l'énergie peut être noire à l'échelle de l'Univers ou que le vide est lui aussi plein d'énergie.

Nous côtoyons ainsi familièrement le mot énergie, et pourtant si nous en saisissons le sens dans chacun des contextes particuliers que je viens d'évoquer, saurions-nous pour autant en énoncer une définition ?

# Énergie(s)

Gravitationnelle

Cinétique

Thermique

Elastique

Electrique

Chimique

Radiante

Nucléaire

Même en en nous cantonnant au domaine de la physique, il semble exister une variété d'énergies. On nous parle d'énergie gravitationnelle, cinétique, thermique, élastique, électrique, chimique, radiante, nucléaire. Cependant, cette multitude n'est qu'apparence trompeuse sur laquelle joue la Nature pour nous embrouiller. Il n'existe qu'une seule énergie que nous nommons différemment selon la forme sous laquelle elle nous apparaît.

# Énergie

Grandeur caractérisant un système physique, gardant la même valeur au cours de toutes les transformations internes du système (loi de conservation) et exprimant sa capacité à modifier l'état d'autres systèmes avec lesquels il entre en interaction. (Unité SI le joule.)

**Larousse**

Commençons par chercher la définition du mot énergie dans un dictionnaire. La définition du Larousse nous dit en fait l'essentiel de ce que nous devons savoir sur l'énergie :

# Énergie

Grandeur caractérisant un système physique, gardant la même valeur au cours de toutes les transformations internes du système (loi de conservation) et exprimant sa capacité à modifier l'état d'autres systèmes avec lesquels il entre en interaction. (Unité SI le joule.)

**Larousse**

1. C'est une quantité (pas une chose) qui caractérise un système physique

# Énergie

Grandeur caractérisant un système physique, gardant la même valeur au cours de toutes les transformations internes du système (loi de conservation) et exprimant sa capacité à modifier l'état d'autres systèmes avec lesquels il entre en interaction. (Unité SI le joule.)

**Larousse**

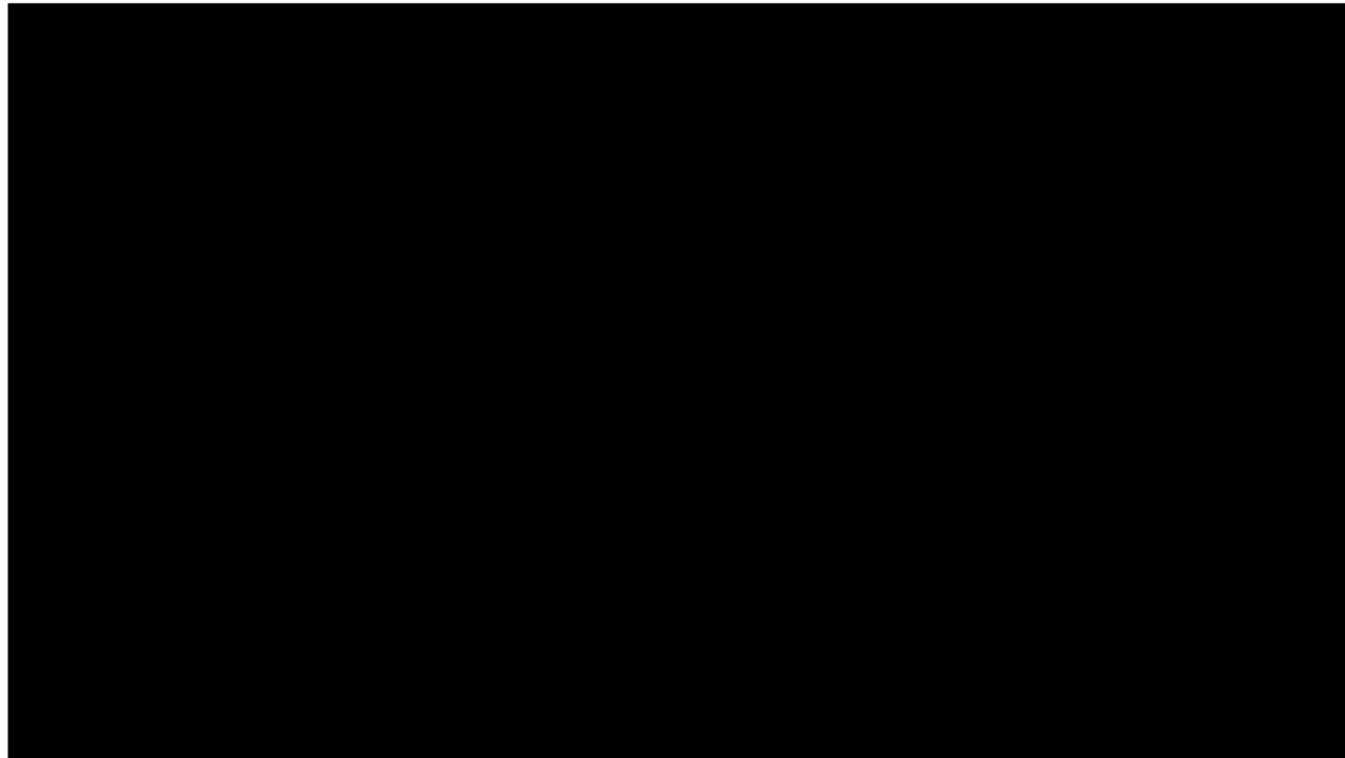
2. Cette quantité se conserve dans tous les processus de la nature

# Énergie

Grandeur caractérisant un système physique, gardant la même valeur au cours de toutes les transformations internes du système (loi de conservation) et exprimant sa capacité à modifier l'état d'autres systèmes avec lesquels il entre en interaction. (Unité SI le joule.)

**Larousse**

3. Elle exprime une capacité à faire quelque chose



Rien ne vaut un voyage dans le temps pour comprendre cette définition et comment elle s'est imposée dans la pratique des sciences physiques. Chemin tortueux, contrairement à ce que l'on pourrait penser.



Une activité interne d'une puissance sous  
l'effet d'une autre et pour une fin

Aristote, Métaphysique

Le mot « energeia » a été forgé par Aristote pour signifier la « force » en action ou l' « activité » . L'énergie, au sens où l'entend Aristote, est l'activité interne d'une puissance sous l'effet d'une autre et pour une fin.

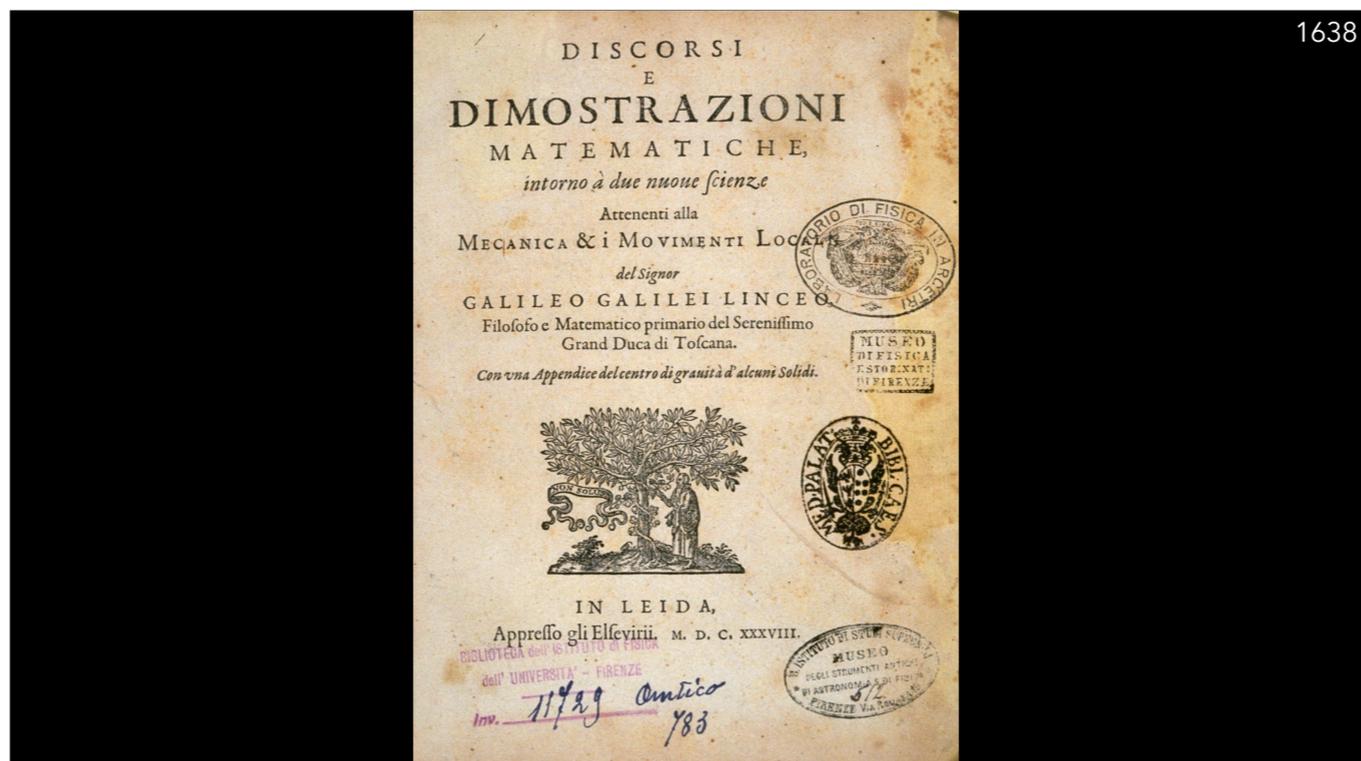
1. L'énergie est donc la manifestation de quelque chose d'interne, propre à chaque être naturel. Chaque être naturel possède en soi le principe naturel de mouvement et de repos
2. Elle se manifeste sous un effet extérieur au corps en question
3. Et l'énergie se réalise pour une fin, pour engendrer une action

L'energeia peut ainsi être vue comme ce qui permet le passage d'une potentialité vers une action, une force que chaque être naturel porte en soi et qui s'exprime sous forme d'action.

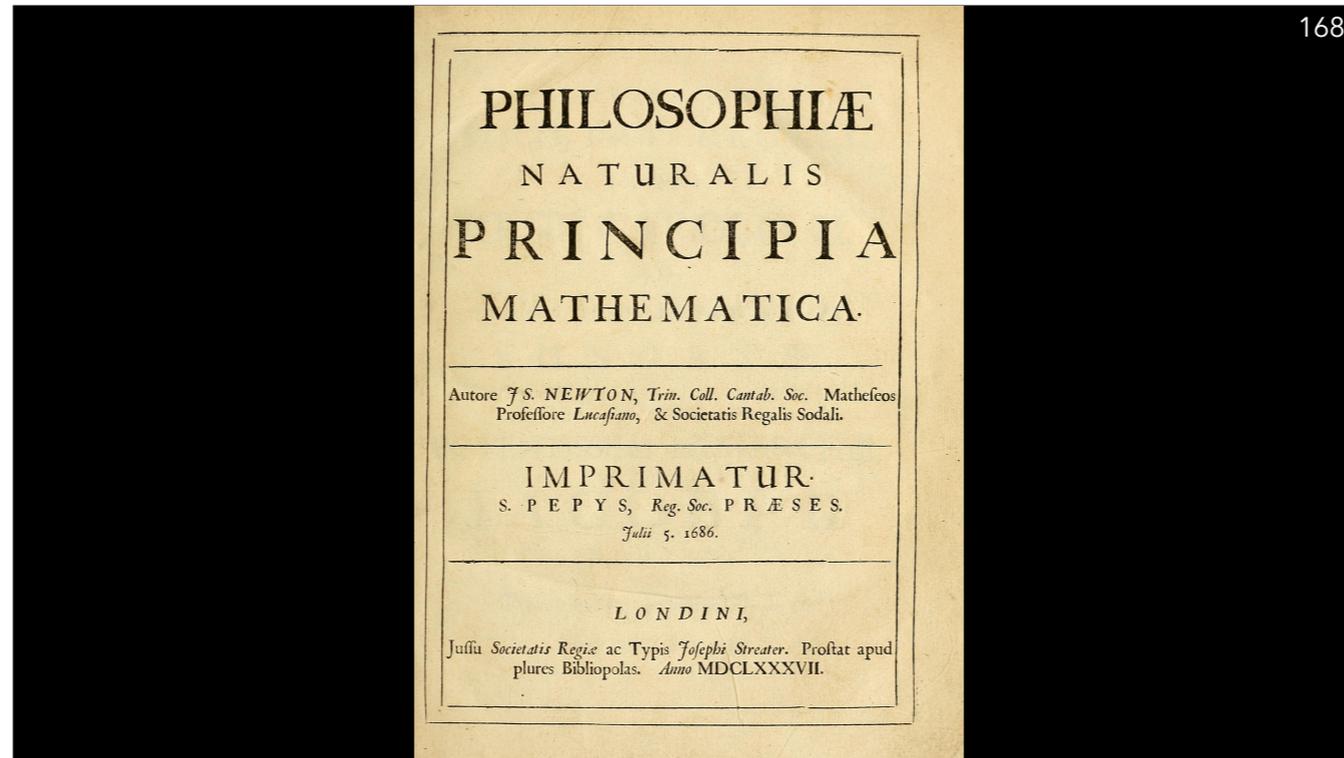
Bon on est plus près d'un discours de métaphysicien que de celui qui nous serait utile pour la compréhension de ce que la physique entend par énergie. Reconnaissons à Aristote son énorme génie ... mais, ne l'oublions pas, néanmoins un génie de l'antiquité. Restons en donc là avec Aristote, et contentons nous de lui attribuer la paternité du mot énergie.



Comme vous la savez, sinon je vous renvoie à mon cours d'il y a 2 ans, la scolastique, ce croisement entre l'enseignement d'Aristote et la théologie chrétienne, a été jusqu'à la fin de la Renaissance la pensée dominante enseignée dans les universités européennes.  
Si elle été parfois contestée, souvent l'énergie du feu fit taire la contestation.



Parmi les contestataires, le plus célèbre et le plus révolutionnaire sans doute fut Galilée qui remisa l'enseignement d'Aristote au placard de l'histoire. Il inventa la méthode scientifique et posa les fondements de la dynamique (la science des systèmes en mouvement, 1638) ... sans jamais faire appel au mot énergie, si ce n'est qu'occasionnellement et encore sans préciser le sens qu'il lui donnait. Son dernier ouvrage, qu'il publia au crépuscule de sa vie, assigné à résidence par l'Inquisition, est intitulé *Discours et démonstrations mathématiques appartenant à deux sciences nouvelles* n'est rien d'autre qu'un traité de la mécanique et du mouvement comme le précise le sous-titre du livre. Il construit cette « science nouvelle » et en développe les démonstrations, sans invoquer à aucun moment le concept d'énergie. C'est donc qu'il n'en avait pas besoin.



Un peu moins de 50 ans plus tard, en 1686, Newton publia son chef d'oeuvre, un ouvrage magistral, dans lequel il formalise en un cadre mathématique rigoureux les idées de Galilée et de Kepler. C'est l'ouvrage qui fait aujourd'hui encore référence pour l'enseignement de la mécanique et pour calculer les différents paramètres permettant, par exemple, de faire décoller une fusée et mettre des satellites en orbite.

En inventant le concept mathématique abstrait de Force, et en énonçant les 3 principes fondamentaux (le principe d'inertie, la proportionnalité de la force et de l'accélération, le principe d'action-réaction) que nous avons tous appris à l'école, il fait choir les pommes des arbres et orbiter les planètes autour du soleil. Newton n'a pas besoin de l'énergie et il n'en fera pas état.

Or il est bien raisonnable que la même force se conserve toujours dans l'univers [...] la force d'un corps n'est pas diminuée qu'à mesure qu'il en donne à quelques corps contigus ou à ses propres parties autant qu'elles ont un mouvement à part.

*Discours de métaphysique, Gottfried Wilhelm Leibniz (1686)*



Gottfried Wilhelm Leibniz contemporain de Newton et surtout son farouche concurrent, tentera lui un timide usage de l'énergie sans la nommer. Dans Discours de la métaphysique (où il discourt des substances, du mouvement et de la résistance des corps, ainsi que du rôle de Dieu au sein de l'univers) appellera force ce qui correspond en fait à la notion actuelle d'énergie.

Il déduit que la force « doit être estimée » égale à la masse du corps multipliée par le carré de sa vitesse ( $m \times v^2$ ) et que cette force ainsi exprimée se conserve.

La force de Leibniz ( $m \times v^2$ ) n'est pas la force de Newton ( $m \times a$ ), ni celle de Descartes ( $m \times v$ ), de quoi troubler l'amateur de physique en cette fin du 17<sup>ème</sup> siècle !

Leibnitz par Raoul Dufy (1936)



Mais c'est à la contribution de Mme du Châtelet que je préfère m'intéresser. Elle suggère le concept d'énergie, pour ceux qui savent lire entre les lignes, toujours sans en prononcer le mot.

Vous vous souvenez sans doute de Gabrielle-Émilie Le Tonnelier de Breteuil, marquise du Chastellet. Dès son plus jeune âge, elle apprend les sciences en particulier avec pour professeur Maupertuis (celui qui a énoncé le principe de moindre action et a démontré que la Terre n'était pas de forme sphérique mais oblate, c'est-à-dire aplatie aux pôles et surtout grand admirateur de Newton). Délaissée par son mari et lassée d'une vie quelque peu désordonnée, elle finira en 1728 par accueillir et dans son château de Cirey près de Troyes et dans ses bras Voltaire de retour de son exil en Angleterre. Là ensemble ils étudieront et populariseront les travaux de Newton. Elle sera la traductrice de la seule version française (traduction et commentaires) des Principia publiée à titre posthume (elle décède en 1749, âgée de 42 ans) en 1758.

1740

INSTITUTIONS  
D E  
P H Y S I Q U E .



A PARIS,  
Chez PRAULT fils, Quai de Conty, vis-à-vis la  
descente du Pont-Neuf, à la Charité.

M. D C C. X L.  
*Avec Approbation & Privilège du Roi.*

Madame la Marquise  
Du Chastellet

En plus de ce travail remarquable, elle publie en 1740 un manuel de physique destiné à son fils dans lequel elle présente les découvertes en physique du 16<sup>ème</sup> et 17<sup>ème</sup> siècle : Galilée, Kepler, Newton, etc... On peut y lire les choses suivantes:

On distingue [...] la Force morte ou Force virtuelle et la Force vive. La Force morte consiste dans une simple tendance au mouvement : telle est celle d'un ressort prêt à se détendre ; et la Force vive est celle qu'un corps a lorsqu'il est dans un mouvement actuel.

*Institutions de Physique, Madame Du Chastelet*

On distingue [...] la Force morte ou Force virtuelle et la Force vive. La Force morte consiste dans une simple tendance au mouvement : telle est celle d'un ressort prêt à se détendre ; et la Force vive est celle qu'un corps a lorsqu'il est dans un mouvement actuel.

*Institutions de Physique, Madame Du Chastelet*

Madame Du Châtelet distingue deux types de force, la force vive et la force morte.

On distingue [...] la Force morte ou Force virtuelle et la Force vive. La Force morte consiste dans une simple tendance au mouvement : telle est celle d'un ressort prêt à se détendre ; et la Force vive est celle qu'un corps a lorsqu'il est dans un mouvement actuel.

*Institutions de Physique, Madame Du Chastelet*

Nous trouvons en terrain connu, rappelons-nous des cours de physique du lycée. Il suffit de remplacer force morte par énergie potentielle et force vive par énergie cinétique, l'énergie potentielle étant associée à une interaction et qui peut générer une action (= énergie stockée e.g. corps à une certaine hauteur dans un champ gravitationnel, compression d'un ressort, étirement d'un élastique)

On distingue [...] la Force morte ou Force virtuelle et la Force vive. La Force morte consiste dans une simple tendance au mouvement : telle est celle d'un ressort prêt à se détendre ; et la Force vive est celle qu'un corps a lorsqu'il est dans un mouvement actuel.

*Institutions de Physique, Madame Du Chastelet*

et l'énergie cinétique qui est associée au mouvement.

Madame Du Châtelet prend le parti de Leibniz contre Descartes dans la définition de la force vive; elle reconnaît et démontre expérimentalement que la force vive est bien proportionnelle à la masse du corps en mouvement et au carré de sa vitesse (et non à la vitesse) ce qui est conforme à ce que nous savons aujourd'hui de l'énergie cinétique :  $E = 1/2mv^2$ .

# Energies cinétique et potentielle



Aujourd'hui on dirait que l'énergie, en mécanique, peut se présenter sous deux formes : l'énergie cinétique est l'énergie associée au mouvement et l'énergie potentielle est l'énergie qui a la capacité de créer un mouvement, c'est l'énergie associée à une force.

L'énergie est le produit de la force appliquée à un corps par le déplacement infinitésimal subi par ce corps sous l'effet de cette force.

Jean Bernoulli

On peut se demander pourquoi Madame Du Châtelet persiste à utiliser le terme Force plutôt que le terme énergie.

Et ce malgré la proposition du mathématicien suisse Jean Bernoulli qui serait le premier à définir le terme énergie en physique en 1717, du vivant donc de Newton.

« L'énergie est le produit de la force appliquée à un corps par le déplacement infinitésimal subi par ce corps sous l'effet de cette force. » C'est ce qu'on appelle aujourd'hui le travail mécanique. Les deux termes se chevauchent quelque peu, le fait que les deux quantités s'expriment en joule ajoute à la confusion. L'énergie est la quantité qui rend un travail possible.

Lorsque votre voiture est en panne et que vous êtes amené à la pousser de toutes vos forces, vous produisez un travail égal à la force mise en oeuvre multipliée par le déplacement de la voiture. Vous avez ainsi produit un travail en dépensant de l'énergie ou plus exactement en transformant de l'énergie musculaire en énergie cinétique.

Quoique le mouvement varie à chaque instant dans l'univers, la même quantité de force vive s'y conserve toujours. [...] Cette force qui est quelque chose de réel, et qui dure comme la matière, ne saurait être détruite, ni produite de nouveau. [...] Ainsi la force ne saurait périr en tout, ni en partie elle peut à la vérité paraître perdue, mais on la retrouverait toujours dans les effets qu'elle a produit, si l'on pouvait toujours apercevoir ces effets.

*Institutions de Physique, Madame Du Châtelet*

Puis madame Du Châtelet continue : « quoique .... ces effets ».

Que nous dit-elle ? Eh bien elle nous dit que la Force est conservée et là aussi en remplaçant Force par énergie, ce paragraphe pourrait figurer dans nos manuels de physique actuels

Quoique le mouvement varie à chaque instant dans l'univers, la même quantité de force vive s'y conserve toujours. [...] Cette force qui est quelque chose de réel, et qui dure comme la matière, ne saurait être détruite, ni produite de nouveau. [...] Ainsi la force ne saurait périr en tout, ni en partie elle peut à la vérité paraître perdue, mais on la retrouverait toujours dans les effets qu'elle a produit, si l'on pouvait toujours apercevoir ces effets.

*Institutions de Physique, Madame Du Chastelet*

elle nous dit que La Force/énergie se conserve (on sait bien aujourd'hui que la Force ne se conserve pas).

Ainsi cet objet que je tiens en main à une certaine hauteur au-dessus du sol possède une énergie potentielle du fait de l'interaction de l'objet avec le champ gravitationnel terrestre (proportionnelle à la masse de l'objet, à la hauteur au-dessus du sol, et l'accélération de la pesanteur terrestre égale à  $9,81\text{m/s}^2$ ). En tombant, l'objet gagne de la vitesse, selon la loi de la chute des corps de Galilée. L'énergie potentielle est ainsi transformée en énergie cinétique tout en conservant l'énergie totale constante, bien évidemment dans les conditions idéales où l'on ignore le frottement de l'objet dans l'air,

Quoique le mouvement varie à chaque instant dans l'univers, la même quantité de force vive s'y conserve toujours. [...] Cette force qui est quelque chose de réel, et qui dure comme la matière, ne saurait être détruite, ni produite de nouveau. [...] Ainsi la force ne saurait périr en tout, ni en partie elle peut à la vérité paraître perdue, mais on la retrouverait toujours dans les effets qu'elle a produit, si l'on pouvait toujours apercevoir ces effets.

*Institutions de Physique, Madame Du Chastelet*

ce que prend bien soin madame du Châtelet de préciser dans la dernière phrase du paragraphe.

Et l'on peut tirer de là toutes les lois du mouvement.

*Institutions de Physique, Madame Du Chastelet*

Et madame du Châtelet termine en écrivant « Et l'on peut tirer de là toutes les lois du mouvement. » Elle érige ainsi la conservation de l'énergie comme principe premier à partir duquel toutes les lois de la mécanique peuvent être déduites.

## Conservation de l'énergie :

$$E_{\text{cinétique}} + E_{\text{potentielle}} = \text{constante}$$

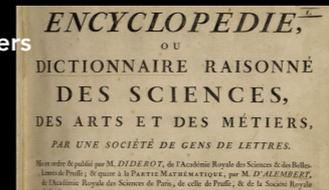
Cette assertion est toujours d'actualité : que ce soit pour décrire la dynamique de la chute d'une pomme ou la dynamique des particules du Modèle Standard de la physique des particules, l'équation du mouvement est toujours la somme de deux termes : l'énergie cinétique et l'énergie potentielle qui dépend de l'interaction, interaction gravitationnelle pour la pomme, interaction électromagnétique pour les électrons, interaction électromagnétique, forte et faible pour les quarks. Aujourd'hui nous savons, en fait nous le savons depuis 1833, grâce au mathématicien irlandais William Hamilton que la mécanique de Newton peut se formuler autrement, de façon plus simple, sans changer l'essence de la mécanique mais en s'appuyant non pas sur le concept de force mais sur le concept d'énergie. Mais cela est une autre histoire qu'on apprend à l'université en première année de physique.

# Force & Énergie

Il apparaît donc que dès la moitié du 18<sup>ème</sup> siècle, le concept d'énergie, bien que cantonné à la seule mécanique, soit plutôt bien établi. Reste cependant un problème de vocabulaire qui crée une certaine confusion entre le concept de Force qui exprime d'abord une action externe sur un corps et le concept d'énergie qui exprime la notion d'état d'un système et des changements de cet état. Ce concept d'énergie reste encore mal maîtrisé...

ENERGETIQUES, s. m. pl. terme dont on s'est servi quelquefois dans la Physique. On a appelé corps ou particules énergétiques, les corps ou particules qui paraissent avoir, pour ainsi dire, une force et une énergie innée, et qui produisent des effets différents, selon les différents mouvements qu'elles ont ; ainsi, dit-on, on peut appeler les particules du feu et de la poudre à canon, des corpuscules énergétiques. Au reste ce mot n'est plus en usage.

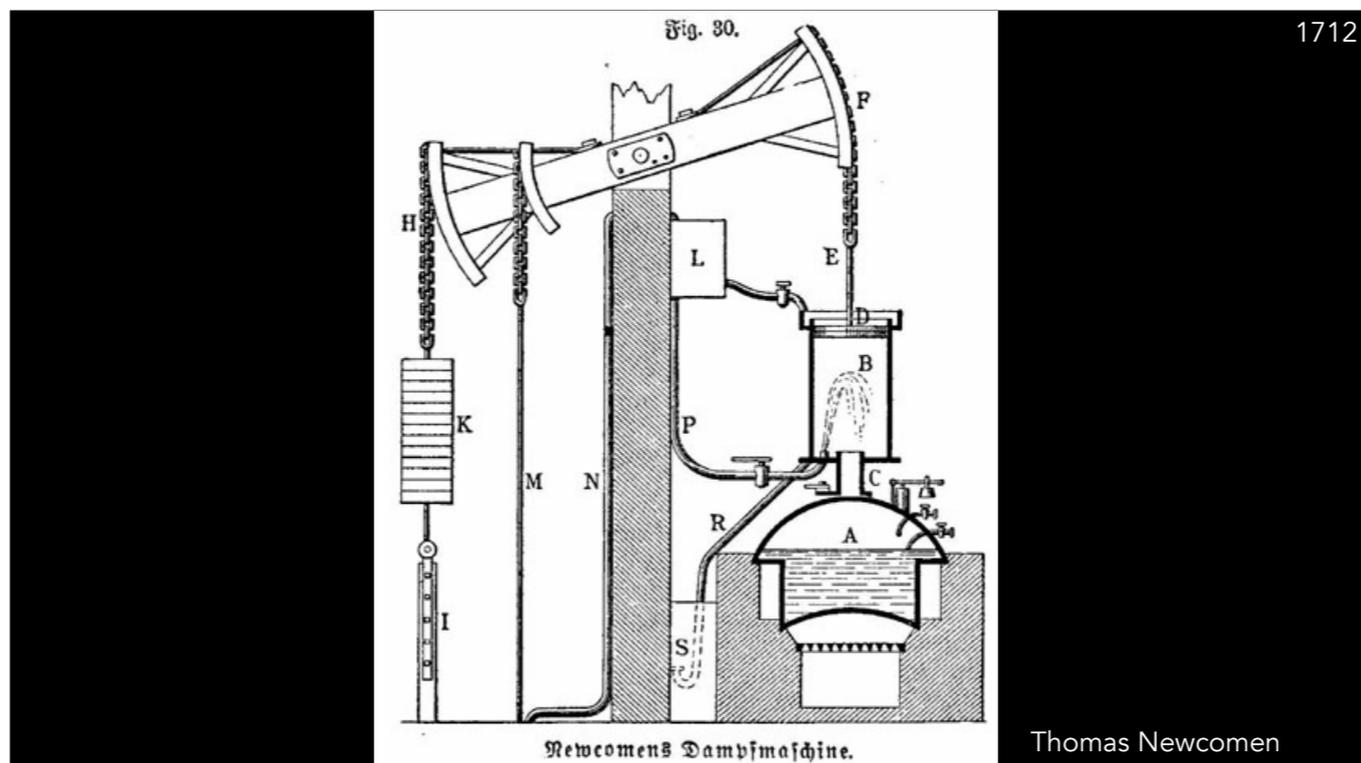
Encyclopédie ou Dictionnaire raisonné des sciences, des arts et des métiers



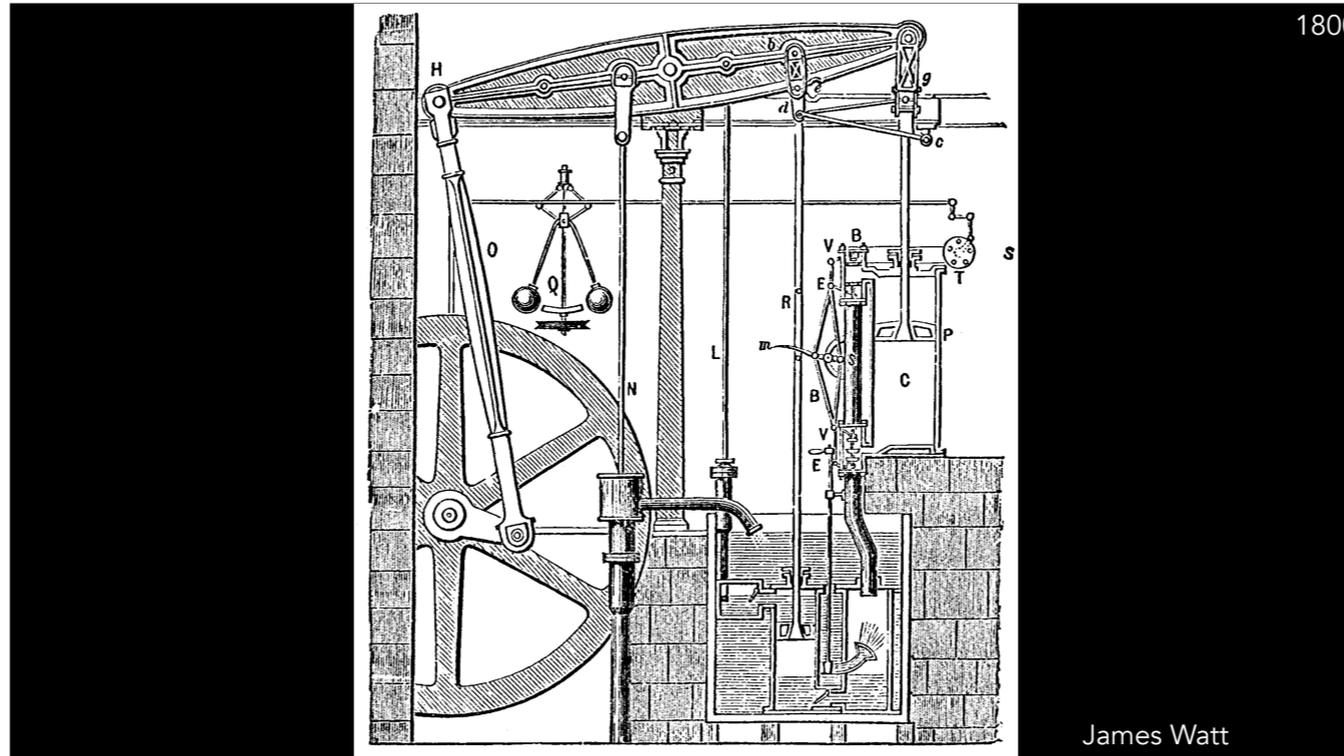
d'ailleurs d'Alembert dans l'encyclopédie en donnera la définition suivante :

# La machine à vapeur

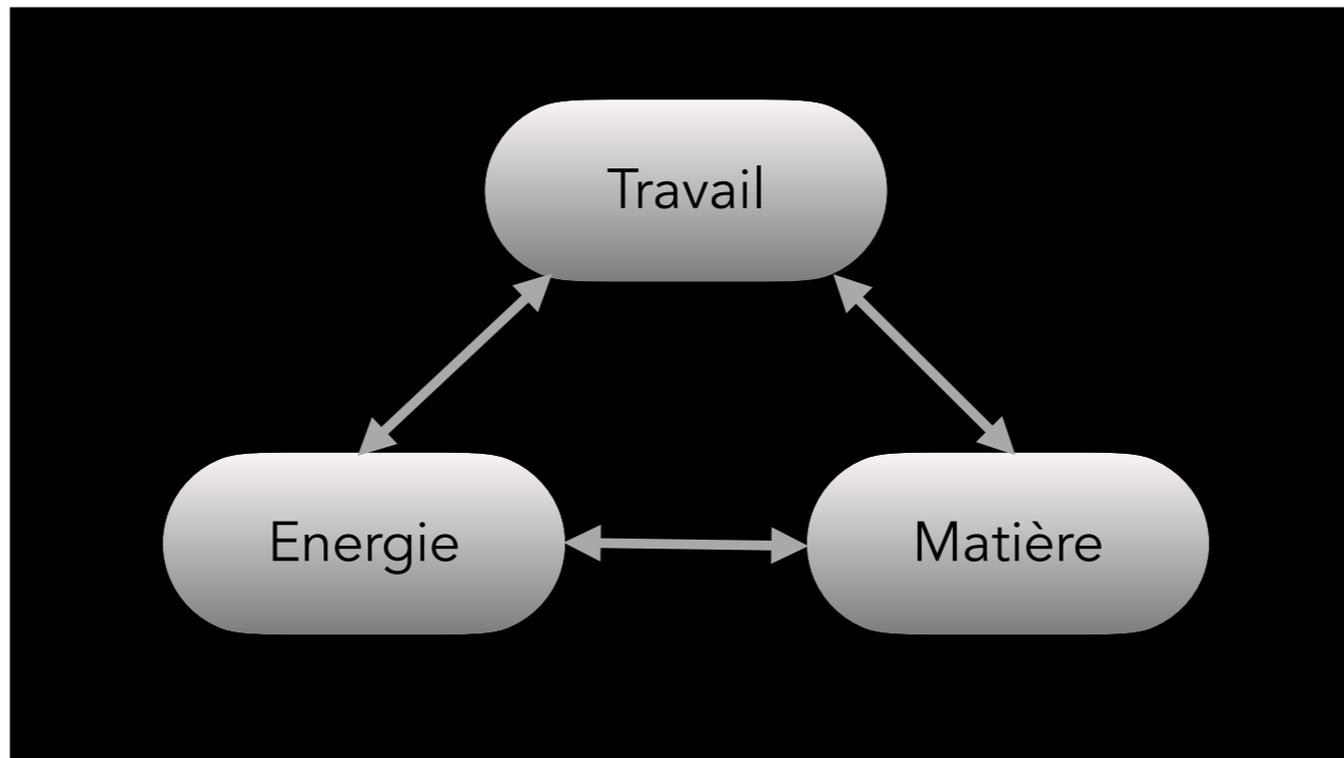
Cependant en même temps que Jean Bernoulli (« L'énergie est le produit de la force appliquée à un corps par le déplacement infinitésimal subi par ce corps sous l'effet de cette force. ») donnait sa toute première définition de l'énergie appliquée à la physique, des ingénieurs développaient des machines dont l'action mécanique était mue par la vapeur.



Le premier de ces ingénieurs était en fait un pasteur et mécanicien anglais, Thomas Newcomen, qui en 1712 développa la première machine à vapeur pour évacuer les eaux d'infiltration dans les mines d'étain du Devon. La paternité de la machine à vapeur est parfois attribuée un autre mécanicien anglais, Thomas Savery, qui en 1698 dépose un brevet pour la première machine à vapeur qui ait réellement fonctionné.



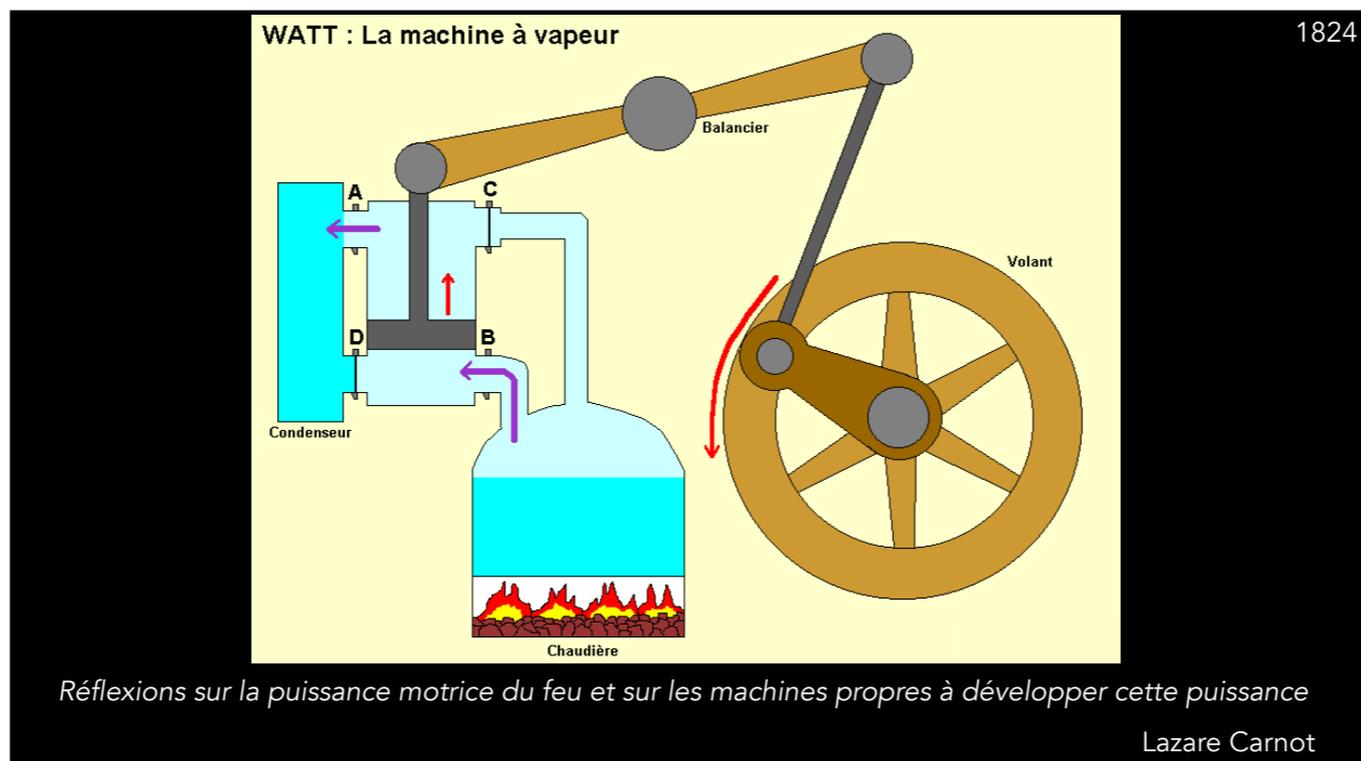
Plus connu est l'ingénieur écossais James Watt qui perfectionna la machine de Newcomen et Savery, déposa de nombreux brevets, et commercialisa sa machine. Ainsi dès 1800 près de 500 de ses machines à vapeur sont en service à travers l'Angleterre. La révolution industrielle était lancée et avec elle l'ère d'homo industrialis.



Avec les machines émerge une nouvelle discipline de la physique : la thermodynamique qui est si on s'en tient à sa définition, la science des phénomènes stationnaires et dynamiques de chaleur, des transformations de l'énergie.

La naissance de cette discipline est avant tout une question économique : il fallait savoir tirer le maximum de puissance motrice d'une quantité définie de charbon, c'est-à-dire faire des économies de charbon, rentabiliser la matière première.

La paternité de cette nouvelle discipline est attribuée au mathématicien, physicien et homme d'état français Lazare Carnot.



Dans son ouvrage de 1824, *Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres à développer cette puissance*, il est le premier à montrer l'applicabilité du principe de conservation d'énergie à des phénomènes non mécaniques. Notons au passage qu'il utilise le terme puissance et non celui d'énergie, davantage de confusion ! Je vais paraphraser la description que fait Carnot du fonctionnement de la machine à vapeur.

Le calorique ou chaleur créé par feu dans le foyer vaporise de l'eau. La vapeur ainsi générée emporte le calorique dans un cylindre où elle actionne un piston (rappelons que le piston à vapeur a été inventé par Denis Papin dès 1690 qui fut ainsi le premier à parvenir d'extraire une force motrice à partir de la chaleur). La vapeur passe ensuite dans un condensateur où elle se liquéfie par contact avec de l'eau froide. Le calorique développé par la combustion et transporté par la vapeur est ainsi transféré à l'eau froide. Et pour finir je cite Carnot *La puissance motrice est donc due, dans les machines à vapeur, non à une consommation réelle de calorique, mais à son transport d'un corps chaud à un corps froid [...] Il ne suffit pas, pour donner naissance à la puissance motrice de produire de la chaleur : il faut encore se procurer du froid ; sans lui la chaleur serait inutile.*

C'est le principe de tout moteur thermique que ce soit une locomotive à vapeur, une tondeuse à gazon ou un réfrigérateur: il faut une source chaude et une source froide et le transport de la chaleur de la source froide à la source chaude est rendu utile en générant une force motrice.

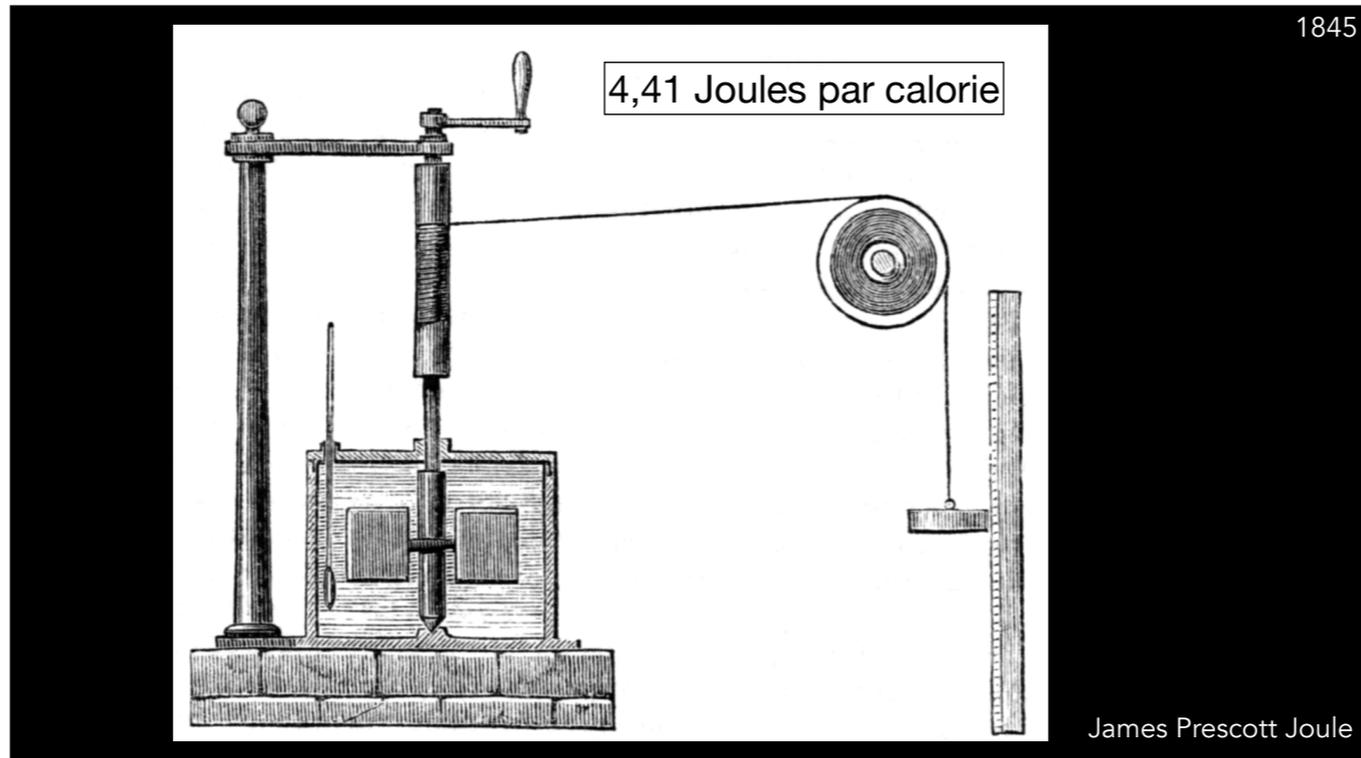
# 1, 2, 3 les principes

1. Conservation de l'énergie
2. L'entropie  $S$  ne peut que croître
3. À  $T=0K$ ,  $S=0$

# 1, 2, 3 les principes

Une autre étape décisive est franchie en 1845 par James Prescott Joule, un riche brasseur anglais, physicien amateur. Il travaille sur la chaleur et démontre son équivalence avec le travail mécanique. Il démontre le principe de la conservation de l'énergie, la première loi de la thermodynamique.

En 1845, il présente un article à l'université de Cambridge intitulé *Sur l'équivalent mécanique de la chaleur*.



Une masse tombante fait tourner une roue à aubes (travail mécanique) dans un cylindre calorifugé rempli d'eau dont l'élévation de température (énergie thermique) est mesurée. Il estime l'équivalent mécanique de la chaleur à 890 pieds-livres/BTU (British Thermal Unit), soit dans des unités plus familières aujourd'hui 4,41 Joules par calorie.

- la calorie est l'énergie nécessaire pour élever la température de 1g d'eau de 1°C;

- le joule est le travail d'une force motrice d'un newton dont le point d'application se déplace d'un mètre dans la direction de la force (soulever 100g de 1 m):

L'expérience a montré que chaque fois que la force vive est apparemment détruite, un équivalent de cette force vive est produit. Cet équivalent est la chaleur.

On the mechanical equivalent of heat, James Prescott Joule



Et Joule de conclure : ....

Il conclut qu'énergie mécanique (force vive) et énergie thermique (chaleur) sont équivalentes

Décidément le terme énergie semble encore banni du vocabulaire des physiciens ... nous sommes en 1845.

Énergie

Energy

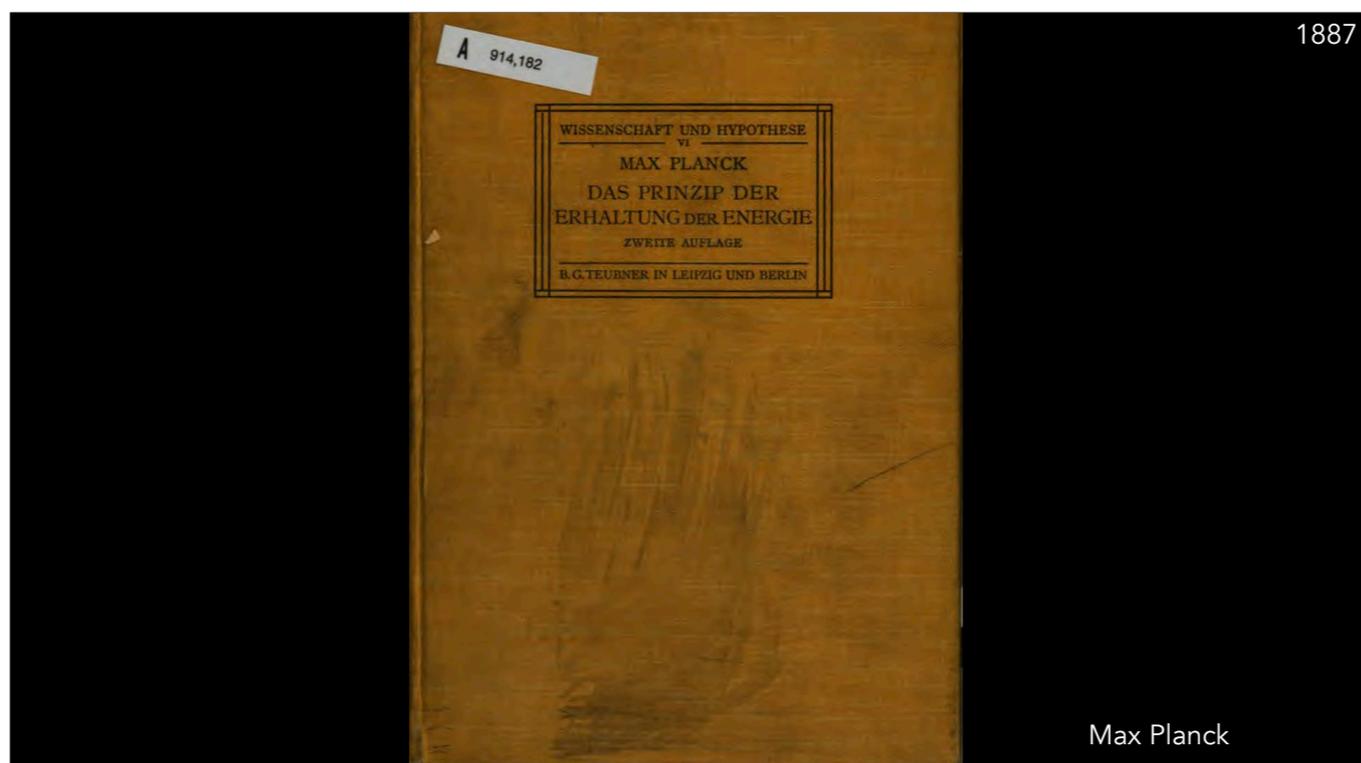
Energie

Le débat restera encore chaud pendant plusieurs années d'errance sémantique. Tous les grands noms de la physique ont chacun à leur tour apporté leur contribution à la définition du concept énergie : Newton, Leibnitz, Huygens, Bernouilli, Lagrange, Faraday, Coulomb, Thomas Young, Carnot, Helmholtz, William Thomson. Cependant, il faudra encore une quarantaine d'année avant que le vocabulaire soit normalisé et qu'en particulier le terme énergie devienne univoque et prenne le même sens quelque soit la langue dans laquelle se parlait la physique (allemand, anglais et français à cette époque).

# Max Planck

Et c'est Max Planck qui va mettre tout le monde d'accord et proposer une définition sans ambiguïté de l'énergie.

Vous vous souvenez sans doute de Max Planck peut-être plus pour son rôle déterminant dans la naissance de la mécanique quantique que pour sa passion pour le deuxième principe de la thermodynamique. Nous avons vu il y a deux ans que l'un ne va pas sans l'autre. En 1878, il soutient à l'université de Munich sa thèse de doctorat intitulée *Über den zweiten Hauptsatz der Wärmetheorie, A propos du deuxième principe de la thermodynamique*. Je reviendrai plus tard sur ce deuxième principe et au concept qui s'y rattache, celui d'entropie. Sa thèse laissa ses professeurs, deux stars de la physique Hermann von Helmholtz et Gustav Kirchhoff, plutôt indifférent. Ce qui ne l'empêcha pas d'obtenir le poste de professeur de physique théorique de Berlin, 9 ans plus tard, remplaçant Kirchhoff décédé et sur recommandation du Helmholtz.



Et en 1887, il publie un ouvrage de 300 pages intitulé *Das Prinzip der Erhaltung der Energie, Le principe de la conservation de l'énergie*. Il est intéressant de noter, que 40 ans plus tôt son ancien professeur et désormais collègue à l'Université de Berlin, Helmholtz, avait publié un ouvrage similaire mais intitulé *Über der Erhaltung der Kraft, A propos de la conservation de la Kraft*, où il est difficile de traduire Kraft par Force car on sait bien que la Force ne se conserve pas, ce qui montre bien l'ambiguïté qui régnait autour des termes de force, puissance et énergie.

- Conservation de la masse
- Conservation de l'énergie



Das Prinzip der Erhaltung der Energie, Max Planck

Dès l'abord il érige en principes universels les 2 lois fondamentales de la Nature que sont la conservation de la masse (nous en reparlerons la semaine prochaine, mais disons le tout de suite la masse ne se conserve pas) et le principe de la conservation de l'énergie. Ces deux lois sont, selon lui, les lois premières c'est-à-dire des lois qui ne peuvent être déduites de lois plus fondamentales encore (nous verrons plus tard qu'il a tort sur ce point) et à partir desquelles toutes les autres lois de la physique peuvent être déduites y compris les lois que l'on ne connaît pas encore et qui seraient nécessaire pour expliquer des phénomènes encore inconnus. Il proclame ainsi la primauté des ces lois sur les 3 principes fondamentaux de la mécanique de Newton (principe d'inertie,  $F=ma$ , action/réaction). Il écrit « la reconnaissance du principe de conservation de l'énergie constitue le seul point de départ commun à toutes les théories qui prétendent être légitimes. [...] La réalisation d'un travail ou la production d'une force vive ne peut se faire sans aucune forme de compensation, ou pour le dire plus simplement : il est impossible de générer du travail à partir de rien. » Je cite cette phrase, pour les utopistes de tout poil qui rêvent encore du contraire !

L'énergie est une quantité que l'on peut associer à tout système et qui est fonction des différents paramètres qui caractérisent l'état de ce système à un instant donné. Elle dépend en particulier des positions et des vitesses des parties du système de leurs interactions mutuelles et sa propriété la plus fondamentale est de rester constante au cours du temps lorsque le système est isolé.

Das Prinzip der Erhaltung der Energie, Max Planck

Il propose alors une définition de l'énergie indépendante de toute discipline particulière de la physique et qui repose uniquement sur des faits mesurables.

« .... »

L'énergie est une quantité que l'on peut associer à tout système et qui est fonction des différents paramètres qui caractérisent l'état de ce système à un instant donné. Elle dépend en particulier des positions et des vitesses des parties du système de leurs interactions mutuelles et sa propriété la plus fondamentale est de rester constante au cours du temps lorsque le système est isolé.

Das Prinzip der Erhaltung der Energie, Max Planck

L'énergie est donc une chose abstraite, une quantité, c'est-à-dire qui peut être représentée par un nombre et dont la caractéristique essentielle est qu'elle se conserve. L'énergie est ainsi définie par sa propriété qui est de se conserver c'est-à-dire le fait qu'aucun processus de la Nature ne peut ni créer ni détruire de l'énergie, la quantité d'énergie dans l'univers reste toujours la même comme le disait déjà Madame du Chastellet.

1902

Il y a quelque chose qui demeure constant

La science et l'hypothèse, Henri Poincaré (1902)



Henri Poincaré dans la Science et l'hypothèse confronté à la difficulté de définir l'énergie ira même jusqu'à éviter de nommer l'énergie et proposera l'énoncé suivant de la loi de conservation de l'énergie :

« il y a quelque chose qui demeure constant »: L'énergie pourrait ainsi être définie comme un nombre qui reste constant pour un système isolé.

Avant d'explicitier davantage ce principe de conservation d'énergie il est indispensable d'introduire un autre concept qui est au coeur du deuxième principe de la thermodynamique qui était également un dada de Planck.

1865

# Entropie



Le concept fut inventé par le physicien Prussien Rudolf Clausius en 1865. Le concept d'entropie ne peut se concevoir qu'associé au deuxième principe de la thermodynamique que Clausius énonça de la façon suivante :

Il est impossible de faire passer de la chaleur d'un corps à basse température vers un corps à haute température sans qu'il n'y ait de transformation concomitante quelque part ailleurs.

Deuxième principe de la thermodynamique, Rudolf Clausius

Nous savons d'expérience que le transfert d'énergie ou de chaleur se fait toujours de la source chaude vers la source froide : une tasse de café chaud se refroidit ou un cube de glace fond dans un verre d'eau. On n'a jamais vu l'inverse se produire de façon spontanée (c'est-à-dire sans l'apport d'un travail extérieur au système, pour faire des glaçons il faut un réfrigérateur dont le moteur apporte le travail nécessaire). Le principe de la conservation de l'énergie ne s'oppose pas à ce qu'une tasse de café se réchauffe et que l'air environnant se refroidisse, ou que l'eau du verre se réchauffe et que le glaçon se forme.

Toutefois, quelque chose empêche que le phénomène se produise.

# Entropie

Clausius découvrit cette entité et la nomma entropie. (du grec  $\epsilon\nu\tau\rho\omicron\pi\eta$  littéralement « action de se retourner » pris au sens de « action de se transformer » désigne à l'origine, la quantité d'énergie qui ne peut se transformer en travail.)

Dans tout système isolé, seuls sont autorisés les processus ou transactions dans lesquels l'entropie soit reste la même, soit augmente. Tout processus conduisant à une diminution de l'entropie était strictement interdit.

L'entropie pourrait se définir en prenant exemple sur la définition de l'énergie de Planck : une grandeur mathématique abstraite qui caractérise un système physique et dont la propriété essentielle est qu'elle ne se conserve pas.

# Entropie

Grandeur fondamentale qui caractérise la capacité d'un système physique à subir des transformations spontanées : plus petite est la valeur de l'entropie, plus grande est la capacité du système à se transformer.

En d'autres termes, l'entropie mesure la qualité de l'énergie disponible dans un système et plus l'entropie est faible plus l'énergie est de bonne qualité c'est-à-dire plus l'énergie est apte à engendrer une action, à se transformer.

# 1, 2, 3 les principes

On peut ainsi reformuler le deuxième principe de la thermodynamique : Au fur et à mesure que l'énergie se transforme (conservation de l'énergie), inexorablement elle se dégrade et devient de moins en moins utilisable (augmentation de l'entropie), plus l'énergie se transforme moins elle a la capacité de se transformer davantage. Le corollaire étant que tout processus conduisant à une diminution de l'entropie est strictement interdit, on dit que les processus réels ne sont pas réversibles. C'est la manière dont la nature s'arrange pour que la chaleur ne passe pas spontanément d'un objet froid à un objet chaud : on ne verra jamais se former un glaçon dans un verre d'eau de façon spontanée .... sauf si on est très très très patient nous dit Boltzmann en 1867 (voir cours 1).

$$S = k_B \times \text{Log} W$$



En effet Boltzmann nous démontre comment un processus réversible obéissant aux lois du mouvement de Newton donne lieu à un phénomène en apparence irréversible (la formation spontanée d'un glaçon dans un verre d'eau est du domaine du possible). Il développe la physique statistique qui s'appuie sur les conceptions atomistes et une approche probabiliste de la théorie de la chaleur et re-interprète le concept d'entropie qui devient une mesure mathématique du désordre des atomes. C'est pour cela que l'on identifie souvent la notion d'entropie avec la notion de désordre. Je ne vais pas en dire davantage car cela nous entraînerait bien trop loin.

- La quantité d'énergie se conserve
- La qualité de l'énergie se dégrade

Ce qu'il faut retenir de toute cette histoire c'est que dans tout processus physique l'énergie se transforme tout en conservant la quantité d'énergie présente dans le système constante, mais qu'au cours des transformations la qualité de l'énergie se dégrade la rendant moins apte à se transformer. Ceci est valable quelque soit le système considéré y compris l'univers : la quantité d'énergie dans l'univers a toujours été la même et restera à jamais la même tandis que la capacité de cette énergie à se transformer s'amenuise avec le temps.

Un exemple pour rendre ces notions plus évidentes :

1. A un moment donné de son histoire la matière de l'univers se présentait sous forme de nuages de gaz d'hydrogène. Lorsqu'un de ces nuages s'effondre sous l'effet de sa propre gravité, le gaz s'échauffe (à l'instar de la pompe à vélo qui s'échauffe quand on comprime le gaz) et forme un soleil : le travail de compression fournit par la gravité est transformé en énergie thermique.
  2. Lorsque la température atteint des valeurs suffisamment élevées, les réactions de fusion nucléaire au coeur du soleil transforment la matière en rayonnement solaire visible (c'est un raccourci, le mécanisme est un peu plus complexe) : l'énergie thermique se transforme en énergie nucléaire qui elle même se transforme en énergie de rayonnement
  3. Les rayons du soleil interceptés par la Terre sont absorbés par les feuilles d'épinard et c'est au tour de l'énergie de rayonnement d'être transformée en énergie chimique contenue dans des glucides.
  4. En mangeant des épinards notre métabolisme transforme cette énergie chimique en énergie musculaire
  5. que nous mettons à profit dans nos activités quotidiennes (comme assister à un cours de physique qui met le cerveau en ébullition) et dont le produit est irrémédiablement de l'énergie thermique, c'est-à-dire un rayonnement infra rouge qui contribue au rayonnement thermique de la Terre dans l'espace.
- Ainsi l'énergie originellement concentrée dans l'attraction gravitationnelle est diffusée in fine dans l'espace sous forme d'énergie thermique. C'est une énergie très dégradée et quasiment inutilisable mais la quantité d'énergie est restée la même.
- La quantité d'énergie restera la même qu'elle soit sous forme gravitationnelle ou sous forme thermique, mais l'entropie aura augmentée traduisant le fait que sous sa

forme d'énergie thermique, l'énergie finale rayonnée dans le vide du cosmos ne servira plus à rien.

Il n'est pas inutile de préciser que le principe de conservation de l'énergie s'applique non seulement à tous les systèmes imaginables mais également à tous les processus de la nature et pas seulement les processus décrits par la thermodynamique. C'est un principe tellement fort qu'il a même permis de découvrir une nouvelle particule. Rappelez vous de mon cours d'il y a 2 ans où j'ai raconté l'histoire de l'invention du neutrino par Wolfgang Pauli en 1914 pour expliquer la distribution en énergie observée des électrons émis dans la radioactivité beta alors que d'autres et pas des moins éminents étaient prêts à renoncer à la conservation de l'énergie dans le monde subatomique.

Les symétries de l'univers ne changent pas les lois de la physique

- Homogénéité de l'espace : **invariance par translation**
- Isotropie de l'espace : **invariance par rotation**
- Homogénéité du temps : **invariance par translation dans le temps**

Revenons à la conservation de l'énergie. Est-ce vraiment un principe premier comme le pensait Planck, c'est-à-dire un principe fondamentale qui ne peut être déduit d'autres principes plus fondamentaux encore ?

Nous savons, et là je vous renvoie à mes cours de l'année dernière, que les théories actuelles en physique sont bâties sur des propriétés de symétrie des interactions ou dit en termes savants sur les propriétés d'invariance des lois de la physique.

Les symétries de l'univers ne changent pas les lois de la physique

- Homogénéité de l'espace : **invariance par translation**
- Isotropie de l'espace : **invariance par rotation**
- Homogénéité du temps : **invariance par translation dans le temps**

En particulier nous avons l'invariance par rapport au temps, ce qui veut dire que les phénomènes physiques résultant d'une loi invariante par rapport au temps ne dépendent pas de l'instant du temps auquel on observe ce phénomène. Si on fait une mesure, par exemple de la vitesse d'un objet en chute libre dans le vide, on obtiendra toujours le même résultat que l'on effectue cette mesure aujourd'hui ou demain qu'on l'ait effectuée hier ou il y a cent ans ou à l'époque pré historique ou ... il y a 13 milliards d'années. Donc même si l'Univers évolue, les lois de l'Univers n'évoluent pas, ce qui veut dire que ce sont les conditions physiques dans lesquelles s'expriment les lois de la physique qui évoluent et non pas les lois elles-mêmes.

1918

Chaque symétrie pour être respectée impose la conservation  
d'une grandeur

- Invariance par translation dans le temps : **énergie**



Invariante Variationsprobleme, Emmy Noether

C'est là qu'intervient la mathématicienne allemande Amaly Emmy Noether (1882-1935), considérée par Albert Einstein comme « le génie mathématique créatif le plus considérable produit depuis que les femmes ont eu accès aux études supérieures » publie un article époustouflant (un monument de la pensée mathématique selon Einstein) en 1918 où elle démontre que la conservation de l'énergie n'est pas un principe premier de la physique mais une conséquence de l'invariance par translation dans le temps des lois de la physique.

Chaque symétrie pour être respectée impose la conservation d'une grandeur

- Invariance par translation dans le temps : **énergie**
- Invariance par translation : **quantité de mouvement**
- Invariance par rotation : **moment cinétique**



Invariante Variationsprobleme, Emmy Noether

En fait le théorème qu'elle démontre est plus général, il dit que toute symétrie ou invariance des lois de la physique a pour conséquence une conservation d'une quantité physique. L'invariance par translation dans l'espace a pour conséquence la conservation de la quantité de mouvement, l'invariance par rotation a pour conséquence la conservation du moment cinétique etc... et donc l'invariance par translation dans le temps a pour conséquence la conservation de l'énergie.

Chaque symétrie pour être respectée impose la conservation d'une grandeur

- Invariance par translation dans le temps : **énergie**
- Invariance par translation : **quantité de mouvement**
- Invariance par rotation : **moment cinétique**



Invariante Variationsprobleme, Emmy Noether

Je ne pourrais pas démontrer le théorème de Noether mais on peut comprendre aisément grâce à une démonstration par l'absurde (exercice favori en classe de terminale) :

Exemple : Imaginons que la constante de gravitation ne soit pas une constante mais qu'elle varie avec le temps, par exemple, elle est plus importante à midi qu'à minuit. Je vais donc élever au prix d'un certain travail un objet massif quelconque, une pomme, d'une certaine hauteur (j'aurai dépensé une certaine énergie  $E1 = mgh$ ) et je fais en sorte qu'elle reste à cette hauteur jusqu'au lendemain à midi. Si je laisse tomber ma pomme à ce moment, comme la valeur de  $g$  a augmenté par rapport à ce qu'elle était à minuit je peux récupérer une énergie  $E2$  qui est plus grande que  $E1$ . Et là je deviens le roi du pétrole, car je peux créer de l'énergie à partir de rien, la différence entre  $E2$  et  $E1$  ... et tout ça parce j'ai postulé une violation d'invariance de loi de gravitation. Si c'était vrai ça se saurait !

# Energie

Une grandeur caractéristique qui se transforme et s'échange

- En conservant la quantité constante
- En dégradant la qualité

S'il faut retenir quelque chose de ce cours, reprenez que l'énergie est une grandeur qui caractérise tout système physique et qui a la capacité de se transformer en ses différentes formes d'énergie. Ces transformations se font en gardant la quantité d'énergie constante c'est-à-dire qu'on ne peut ni créer ni détruire de l'énergie. Au cours de ces transformations la qualité de l'énergie est dégradée toujours dans le même sens, plus l'énergie se transforme plus elle perd sa capacité de se transformer.

1. L'énergie est-elle continue ?
2. Quelle est l'énergie de l'Univers ?
3. Y-a-t-il de l'énergie dans le vide ?

Mais ce n'est pas encore la fin du cours. On peut parler d'énergie sans évoquer les révolutions et découvertes qui ont ébranlé notre façon de voir les choses de la Nature. Sans vouloir refaire mes deux cours des années précédentes, un bref rappel qui vous incitera certainement à réviser ces cours.

3 questions :

1. Énergie est-elle continue ?
2. Quelle est l'énergie de l'Univers ?
3. Y a-t-il encore de l'énergie dans le vide ?

Le premier rappel concerne les échanges d'énergie.

Notre expérience de tous les jours nous fait croire que les échanges d'énergie sont continus, ce que Leibniz avait traduit par « *Natura non facit saltus* », la nature ne procède pas par sauts : toute la physique dite classique repose sur le continu, en particulier l'énergie est considérée comme une entité continue. Max Planck est le premier à ouvrir, un peu malgré lui, les portes du monde quantique, c'est-à-dire un monde où apparaissent des discontinuités.

1900

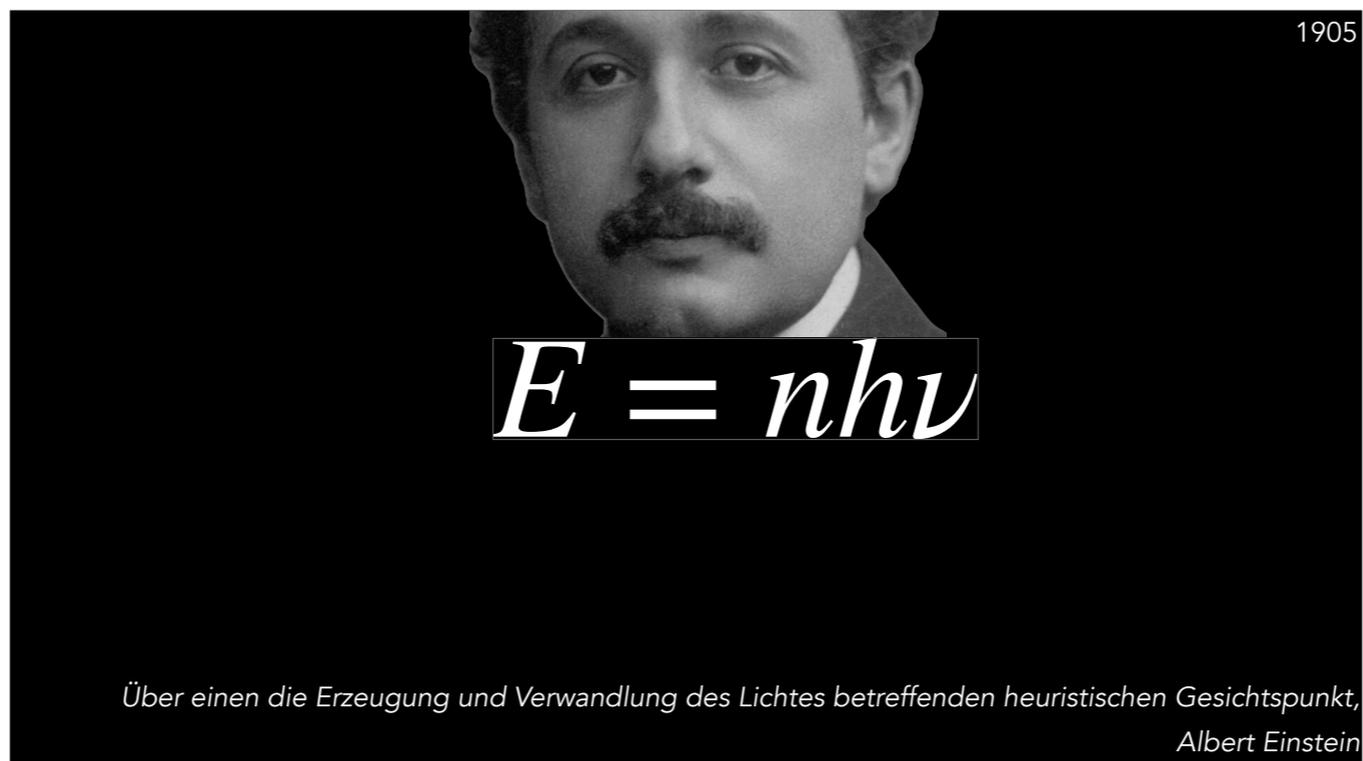
$$\Delta E = nh\nu$$



*Zur Theorie des Gesetzes der Energieverteilung im Normalspectrum, Max Planck*

Il découvre en étudiant les échanges d'énergie entre le rayonnement électromagnétique et la matière (c'est la fameuse expérience du rayonnement du corps noir) que ces échanges sont discontinus, c'est-à-dire se font pas paquets d'énergie discrets. J'avais illustré cette découverte par l'analogie de l'économie du beurre. Alors que le beurre peut exister en n'importe quelle quantité, au supermarché vous ne pourrez acheter le beurre que par quantité de 125g ou multiple entier de 125g, la vente de beurre est quantifiée.

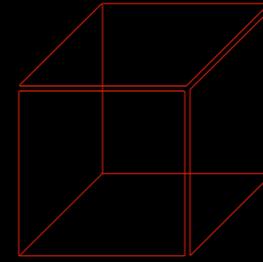
Alors que Planck avait suggéré que les échanges d'énergie entre la matière et le rayonnement étaient quantifiés, Einstein dit que non, c'est le rayonnement lui-même qui est quantifié !



La lumière vient par paquets d'énergie, un nombre entier de paquets, paquet qu'Einstein appeler le lichtquantum et qui deviendra plus tard le photon.  
Pour revenir à l'analogie du beurre : si au supermarché on ne peut acheter le beurre que par paquets de 125g c'est que le beurre n'existe que par paquet de 125g. Le plus petit morceau de beurre qui existe est le paquet de 125g et les quantités de beurre ne viennent qu'en un multiple de paquet de 125g, le beurre en vrac n'existe pas.

Quittons les rayons du supermarché pour nous plonger dans l'univers...

# Énergie Noire



Vous en avez certainement entendu parler ou lu, que l'univers serait remplie d'une mystérieuse énergie, un énergie noire. C'est un des concepts les plus intrigants de la physique actuelle. Rapidement d'où vient ce concept d'énergie noire.

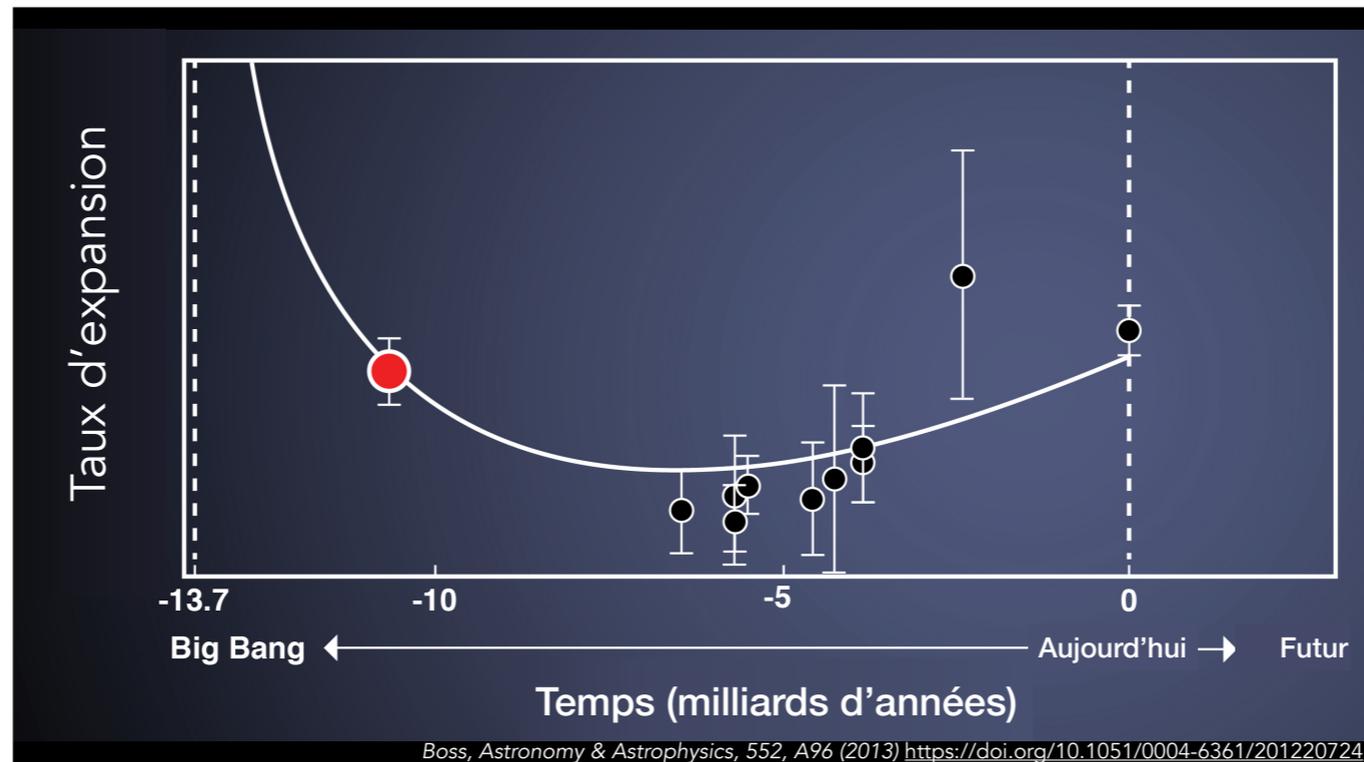
Rappelez-vous de mon cours de l'année dernière : Edwin Hubble en 1929 démontre grâce à ses mesures de l'éloignement des galaxies que l'hypothèse de George Lemaître d'un Univers en expansion est pertinente. La loi de Hubble dit que les galaxies s'éloignent les unes des autres à une vitesse d'autant plus grande que la distance entre les galaxies est plus grande. Plus une galaxie est éloignée de la notre, plus elle s'éloigne rapidement de nous. Cet éloignement définit ce que l'on appelle le taux d'expansion de l'univers.

A partir de 1998, les équipes de Saul Perlmutter, Adam Riess et Brian P. Schmidt (prix Nobel 2011) découvrent que le taux d'expansion mesuré pour des objets très lointains (supernovae = phénomènes liés à implosion d'une étoile en fin de vie, notamment une gigantesque explosion qui s'accompagne d'une augmentation brève mais fantastiquement grande de sa luminosité; apparition d'une nouvelle étoile éphémère marquant la mort d'une étoile !) n'est pas constant mais au contraire augmente avec le temps, en d'autres termes l'expansion de l'univers s'accélère avec le temps !

Une brève remarque sur la signification de l'expansion de l'espace-temps s'avère nécessaire. On pourrait s'interroger quelle est la nature de cet espace-temps qui, tel un ballon de baudruche, gonfle avec le temps. L'image est incorrecte, l'espace-temps n'est pas une chose qui gonfle. Cette expression maladroite d'expansion de l'espace-temps ne fait que traduire le fait que la densité de matière dans l'univers décroît avec le temps, un fait que l'on déduit de l'observation que les objets de matière dans l'univers s'éloignent sans cesse les uns des autres .

L'expansion de l'univers est une conséquence générique des lois de la relativité générale. Celles-ci stipulent en effet que l'univers dans son ensemble est soumis à des forces imposées par les différentes formes de matière qui le composent, et que sauf cas particulier, celui-ci ne peut demeurer statique. De plus, l'expansion de l'univers influence la densité et la pression des différentes formes de matière qui existent dans l'univers. Ainsi, c'est la connaissance de certaines propriétés physiques de toutes

ces formes de matière (en particulier leur équation d'état) qui permet de prédire le comportement exact de l'expansion. Les équations qui la décrivent sont connues sous le nom d'équations de Friedmann.



Ce graphe illustre cette observation. En regardant autour de nous, nous voyons les galaxies et amas de galaxies s'éloigner de notre amas local de galaxies (dont fait partie la Voie lactée) et les uns des autres de sorte que la distance les séparant augmente avec le temps. En regardant des galaxies très éloignées de nous, nous voyons comment les objets se sont éloignés dans un passé lointain (plus nous regardons loin plus nous voyageons dans le passé du fait de la finitude de la vitesse de la lumière).

On peut en déduire que l'accélération de l'expansion aurait débuté il y a environ 8 milliards d'années. Auparavant, l'expansion de l'Univers était freinée. La gravitation de la matière étant suffisante pour ralentir l'impulsion initiale du big bang.

Quel est le moteur de cette accélération : on n'en sait rien et on a donc émis l'hypothèse de l'existence de quelque chose qu'on appelle l'énergie noire, noire parce qu'on ne la voit pas (elle n'émet, ni absorbe, ni ne réfléchit la lumière) et parce qu'on en ignore la nature. Formellement de façon savante, l'énergie noire est un fluide parfait, isotrope, caractérisé par une importante pression négative et qui n'interagit pas avec la matière baryonique.... Donc l'énergie noire n'est pas une forme d'énergie et de plus n'est pas noire non plus! Mais continuons quand même à l'appeler énergie noire.

L'énergie noire est supposée être présente partout dans l'univers, sa densité est, relativement, extrêmement ténue dans notre environnement proche (système solaire) mais elle est dominante dans les vides séparant les très gros amas de galaxies. Sa densité ne change pas avec l'expansion de l'univers. En conséquence, avec le temps l'énergie noire prend de l'importance pendant que la matière ordinaire est de plus en plus diluée du fait de l'expansion. Dans le système solaire, nous n'en ressentons pas les effets car sa densité est bien trop faible.

On ignore quelle est cette chose qui fait que les galaxies s'éloignent les unes des autres bien plus rapidement que ce que l'on avait imaginé. Pour rendre compte des

observations et en supposant que les lois de physique, notamment la gravitation, sont universelles, c'est-à-dire les mêmes en tout endroit de l'univers et à tout instant du temps, on doit poser que cette chose, appelée énergie noire, représente 70% de l'énergie totale de l'univers. Le restant étant de la matière noire et de la matière ordinaire (j'y reviendrai).

Il existe quelques pistes pour comprendre la nature de cette énergie noire

L'une d'elle est de dire que l'énergie noire serait déjà présente dans les équations de la relativité générale et se cacherait dans ce qu'on appelle la constante cosmologique. Ce paramètre a été introduit par Einstein en 1917, une sorte de répulsion de l'espace vis-à-vis de lui-même et dont la valeur non nulle devrait imprimer une accélération de l'expansion de l'univers.



Un autre énigme que nous soumet la fantasque Nature : l'énergie du vide quantique. A nouveau je dois faire référence au cours de l'année dernière cette fois. Rappelez vous. Le vide est ce qui reste lorsqu'on tout enlevé, tous les objets physiques tels les quarks, leptons, photons : videz l'univers, il reste le vide c'est-à-dire il reste les champs quantiques associés aux différentes particules, champs quantiques qui sont les potentialités d'existence des particules (c'est le moment de réviser le cours de l'année dernière!). Vu l'absence de toute particule, nous sommes bien dans le vide, les champs quantiques sont dans leur état fondamental, c'est-à-dire dans leur état de plus basse énergie.

Il se trouve, et c'est une idée avancée par George Lemaître en 1934, que l'effet gravitationnel du vide quantique est strictement équivalent à l'effet de la constante cosmologique (l'énergie du vide dans la théorie quantiques des champs possède la même équation d'état que la constante cosmologique vue comme un fluide parfait avec une pression négative énorme). Bingo : vide quantique, constante cosmologique et énergie noire ne serait alors qu'une et même chose ?

Les choses se compliquent lorsqu'on se lance dans des calculs.



Avec la mécanique quantique il est possible de calculer cette énergie du vide, énergie qui existe en tout point de l'univers et on trouve une énergie incroyablement énorme au point de devenir même embarrassante  $10^{113}$  joules par  $m^3$  ! Alors que la densité d'énergie noire nécessaire pour expliquer l'expansion de l'univers est à peine de 1 nano joule ( $10^{-9}$ ) par  $m^3$  !

Non contente d'être incompatible avec la valeur mesurée, la densité d'énergie du vide quantique est incompatible avec notre existence, avec l'existence de l'univers même tel que nous le connaissons : l'expansion exponentielle résultante au tout début de l'univers aurait empêché la formation des premiers noyaux d'atomes, l'allumage des premières étoiles, etc... Mais la valeur mesurée de la constante cosmologique résulte de la convolution d'une contribution classique, celle ajoutée par Einstein, et la contribution du vide quantique. Il suffit donc d'ajuster la constante des équations de la RG pour que la somme des deux soit compatible avec la valeur mesurée. Mais cette valeur ajustée doit être précise de façon extraordinaire, sur plusieurs dizaines de décimales. Si la gravité avait été un peu plus importante (comparée à l'énergie noire et le taux d'expansion cosmique initial), l'univers se serait effondré avant que la vie ne voit le jour. Un peu moins de gravité et l'expansion de l'univers aurait été trop rapide pour permettre aux étoiles de se former. Ceci signifie que, pour une raison obscure, notre univers, loin de correspondre à une solution générique des équations de la RG, en est, au contraire, une solution très particulière, très peu naturelle. C'est le problème de l'ajustement fin (fine tuning) . Une erreur infime dans cet ajustement donne lieu à des conséquences désastreuses pour l'évolution de l'univers qui en résulte ... et donc pour notre existence.



D'où ma question, pourquoi existons-nous ? Comment le mécano a trouvé le bon ajustement de la constante cosmologique parmi tous les ajustement possibles

Hasard ? Il a essayé tous les ajustements possibles jusqu'à tomber sur le bon ajustement, mais alors qu'est-il advenu de tous les brouillons d'Univers ? Et maintenant, se repose-t-il ou continue-t-il à essayer d'autres ajustements ?

Choix délibéré ? Le mécano est génial, il savait ce qu'il fallait faire pour permettre l'émergence d'une intelligence qui souffrira de mille tourments pour comprendre le pourquoi de son existence

Il nous manque une pièce du puzzle ? Une nouvelle loi qui reste à découvrir ?