Pourquoi $E = Mc^2$?

Yves Schutz

Pourquoi $E = Mc^2$?

La démonstration …

Comme je vous l’avais annoncé la semaine dernière, nous avons maintenant en main tous les éléments nécessaires pour comprendre comment le trio, E, M et c, s’est rencontré pour donner forme à la plus célèbre des équations de physique. Nous devrions être presque capable avec ce que nous savons de construire cette équation tant la dérivation peut apparaître triviale … une fois la dérivation connue !

☐ L’énergie est conservée

☐ La masse est conservée

☐ c invariant

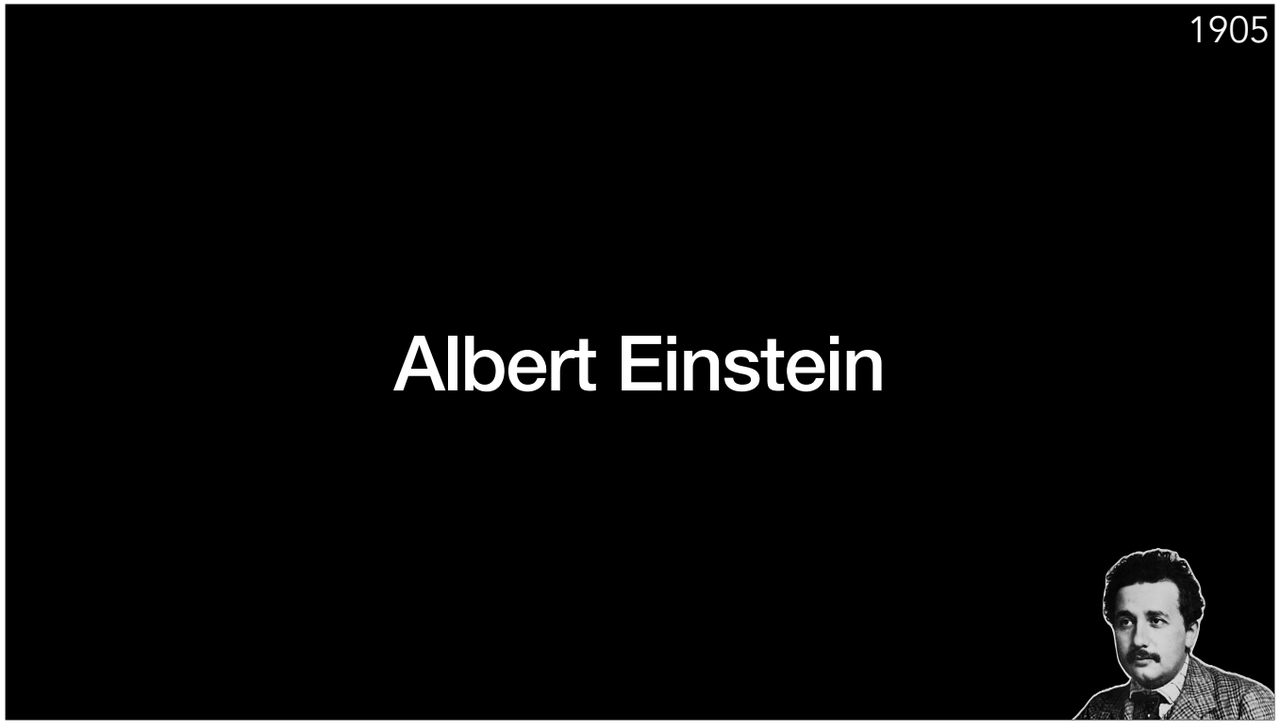
☐ Principe de relativité

Commençons par un petit retour en arrière et par un rappel de ce qu’il fallait retenir des 4 cours précédents. Du premier cours consacré au E de Energie, nous avons retenu que l’énergie est une quantité qui se conserve et on peut toujours la décomposer en énergie potentielle liée à une force et énergie cinétique liée au mouvement.

Du deuxième cours consacré au M de Masse nous avons retenu que la masse elle également se conserve (nous sommes en 1905). De ces deux lois de conservation, Planck avait fait les principes de base à partir desquels toute les lois de la Nature pouvaient se déduire. Rappelons-nous aussi que la masse représente l’inertie, c’est-à-dire la résistance de l’objet à changer sont état de mouvement.

Du troisième et quatrième cours nous avons retenu que la Nature s’est dotée d’une constante universelle pour structurer l’espace-temps ou plutôt la représentation que nous nous faisons de l’espace-temps. c a les dimensions d’une vitesse et représente la vitesse maximum que nul objet matériel ne peut atteindre. La lumière, comme toutes les particules de masse nulle (photon, gluon, graviton) se propage toujours à une vitesse dont la valeur est égale à c, elle ne connaît pas le repos.

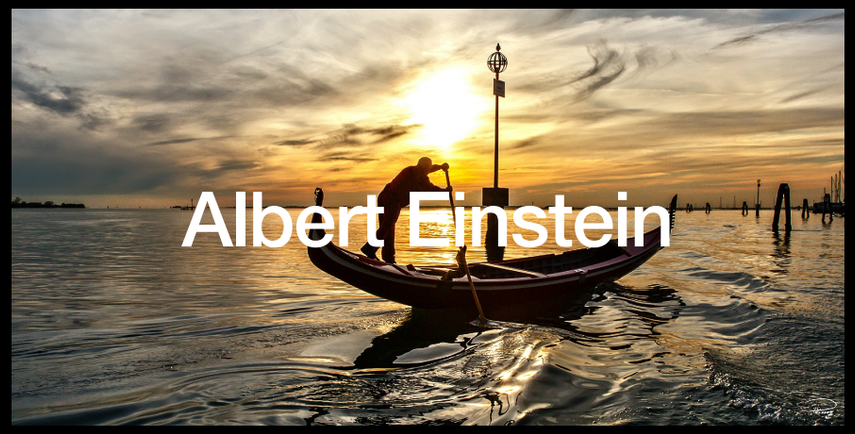
Nous avons retenu que la théorie de la relativité restreinte s’appuie sur deux principes, le premier impose que toutes les lois de la physique ne changent pas que l’on soit au repos ou en mouvement rectiligne et uniforme (principe de relativité) et que la vitesse de la lumière ne change pas quelque soit l’état de mouvement de source de lumière (invariance de c).
Il suffit maintenant de mettre toutes ces connaissances acquises en pratique.



Albert Einstein l’a fait. Rappelons-nous : pendant le premier semestre de 1905, 5 années après l’obtention de son diplôme de l’Ecole Polytechnique de Zürich, Albert Einstein, jeune inconnu de 26 ans, récemment naturalisé Suisse, obscure expert de 3ème classe à l’Office Fédéral de la Propriété Intellectuelle de Berne, publie 3 articles époustouflants dans Annalen der Physik, la revue la plus prestigieuse des revues scientifiques allemandes, 3 articles qui révolutionnent notre appréhension des choses de la Nature. Dans le premier de ces articles, l’article de l’effet photoélectrique, il révèle la nature corpusculaire de la lumière; dans le deuxième, l’article du mouvement Brownien, il révèle la nature atomique de la matière; dans le troisième, l’article de la relativité (restreinte) il révèle la vrai nature de l’espace et du temps, devenus indissociables.

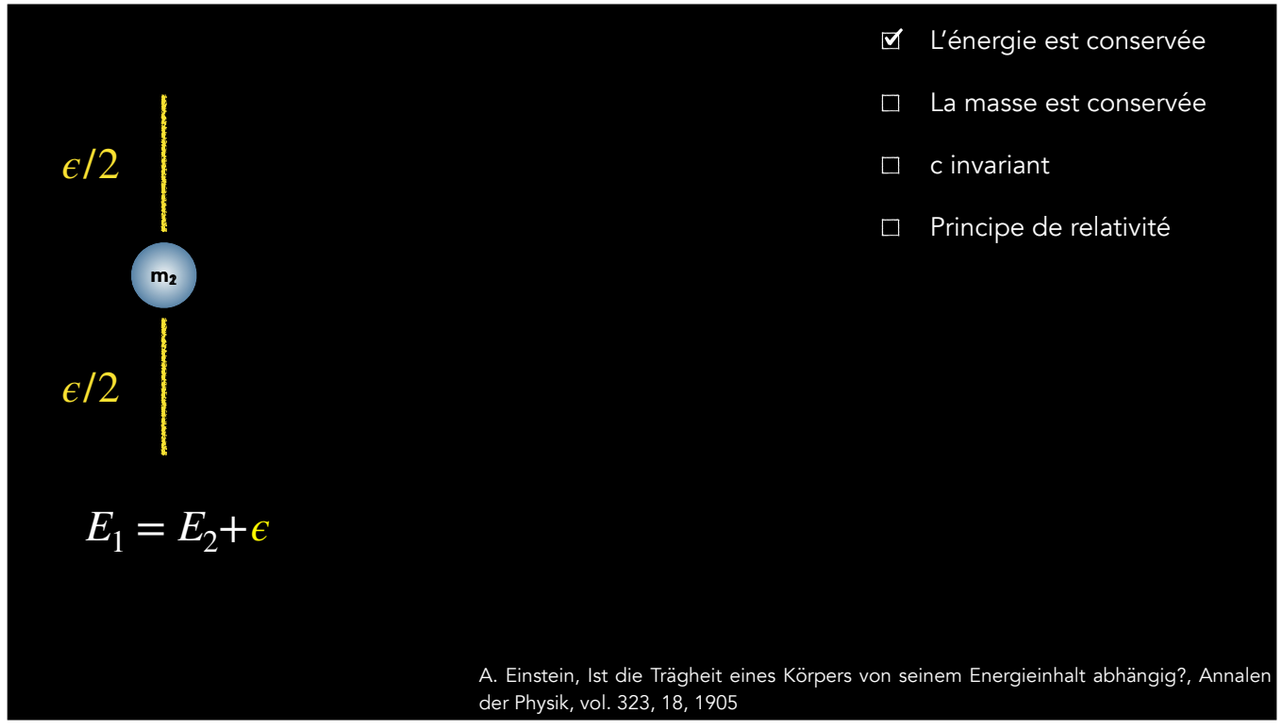
Il rédige également une thèse de doctorat (20 pages), intitulée « Eine neue Bestimmung der Moleküldimensionen » (Une nouvelle détermination des dimensions moléculaires), et obtiendra son diplôme de doctorat le 15 janvier 1906.

1905



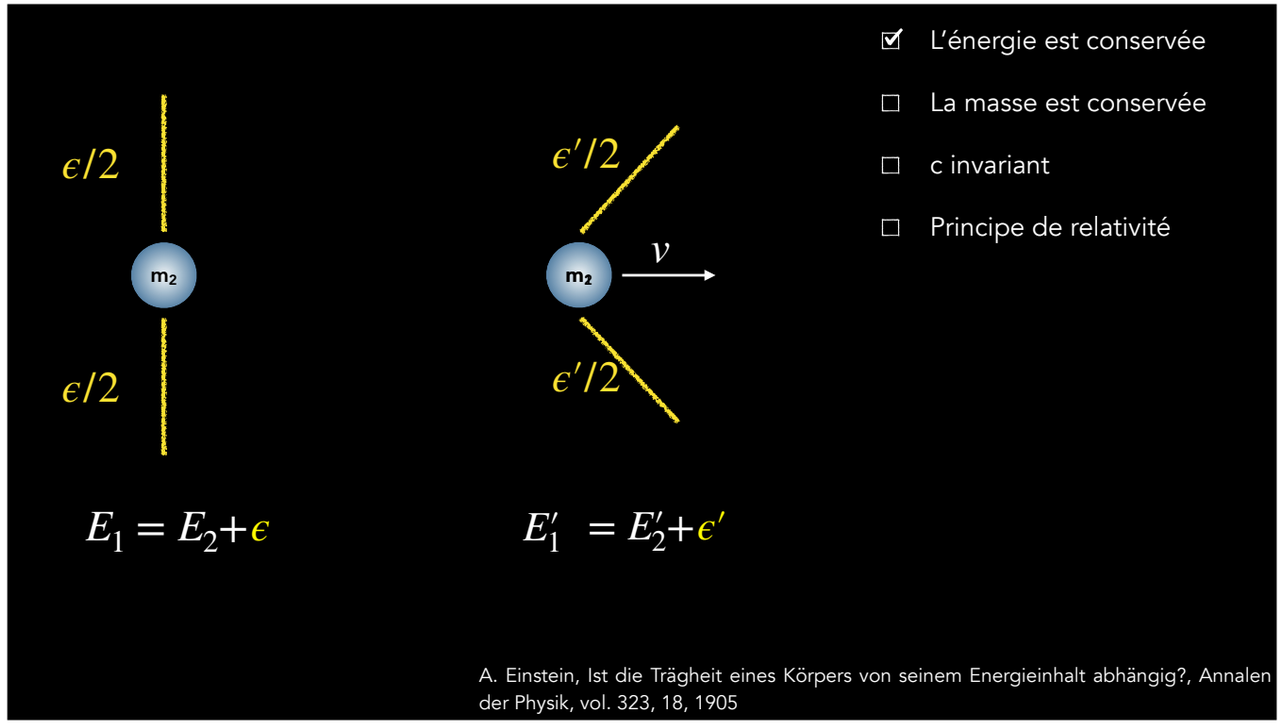
A. Einstein, *Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhängig?*, Annalen der Physik, vol. 323, 18, 1905

En juillet il prend quelques semaines de vacances en Italie, et à son retour rédige un quatrième article qu'il envoie en septembre à Annalen der Physik. Le titre est rédigé sous forme de question : Est-ce-que l'inertie d'un corps dépend de son contenu en énergie ?
C'est un article très cours, à peine 3 pages, des calculs triviaux et un raisonnement implacable qui conduisent à la célèbre équation. On pourrait presque entendre Einstein nous dire : vous vous souvenez de mon article d'avant les vacances sur le principe de relativité, le fait que les lois de la physique ne dépendent pas de l'état de mouvement du système. En fait, j'ai oublié de vous dire quelque chose, une conséquence très intéressante de ce principe.
Suivons pas à pas le raisonnement de Einstein.

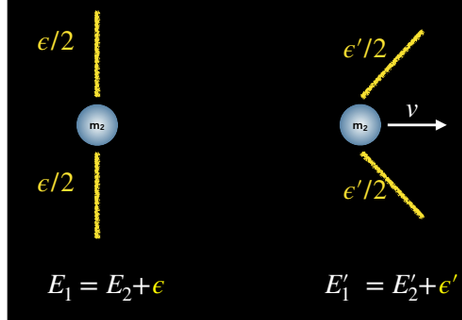


Soit un corps (une boule de pétanque que l'on chauffe, par exemple), dans le système dans lequel il est au repos (l'observateur chevauche le corps), de masse m_1, d'énergie E_1 (totale = potentielle + cinétique), qui émet un rayonnement infra rouge en se refroidissant. Décomposons ce rayonnement en processus élémentaires, soit 2 rayonnements identiques d'énergie ε/2 chacun et dans des directions opposées pour conserver la quantité de mouvement. Après émission l'énergie du corps est E_2 et sa masse m_2.

En appliquant la loi de la conservation de l'énergie $E_1 = E_2 + \varepsilon/2 + \varepsilon/2 = E_2 + \varepsilon$



Le corps se déplaçant à une vitesse v dans la direction horizontale, l'observateur immobile verra le phénomène différemment avec les notations primées évidentes.



$E_1 = E_2 + \epsilon$ $\quad$ $E_1' = E_2' + \epsilon'$

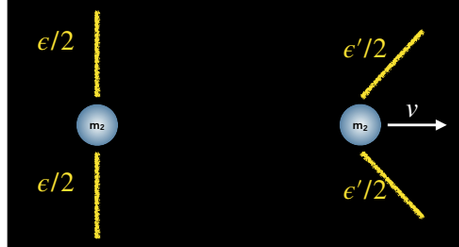
- ☑ L'énergie est conservée
- ☐ La masse est conservée
- ☐ c invariant
- ☐ Principe de relativité

$$K_{\text{avant}} = E_1' - E_1$$

$$K_{\text{après}} = E_2' - E_2$$

A. Einstein, Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhängig?, Annalen der Physik, vol. 323, 18, 1905

Par définition de l'énergie cinétique : énergie du système en mouvement - énergie du système au repos. On écrit l'énergie cinétique K avant et après l'émission.



- [x] L'énergie est conservée
- [ ] La masse est conservée
- [ ] c invariant
- [ ] Principe de relativité

$E_1 = E_2 + \epsilon$

$E_1' = E_2' + \epsilon'$

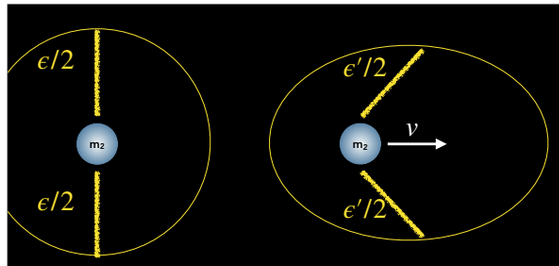
$K_{\text{avant}} = E_1' - E_1$

$K_{\text{après}} = E_2' - E_2$

$$K_{\text{avant}} - K_{\text{après}} = (E_1' - E_1) - (E_2' - E_2)$$
$$= \epsilon' - \epsilon$$

A. Einstein, Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhängig?, Annalen der Physik, vol. 323, 18, 1905

Quelle est la perte d'énergie cinétique due à l'émission du rayonnement ? C'est la différence K_{avant} - $K_{après}$ égale à la différence de l'énergie du rayonnement mesuré dans le système en mouvement moins l'énergie mesurée dans le système stationnaire.



- ☑ L'énergie est conservée
- ☐ La masse est conservée
- ☑ c invariant
- ☑ Principe de relativité

$E_1 = E_2 + \epsilon$ $\quad E_1' = E_2' + \epsilon'$

$K_{\text{avant}} = E_1' - E_1$

$K_{\text{après}} = E_2' - E_2$

$K_{\text{avant}} - K_{\text{après}} = \epsilon' - \epsilon$

$$\epsilon' = \epsilon \times \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

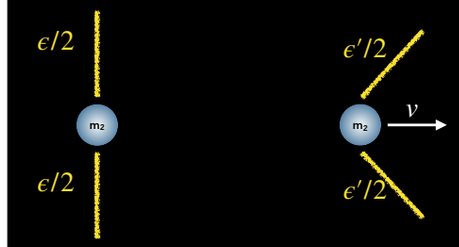
$$\sim \epsilon \times \left(1 + \frac{1}{2}\frac{v^2}{c^2} + \dots\right)$$

A. Einstein, Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhängig?, Annalen der Physik, vol. 323, 18, 1905

Pour connaître la relation entre ε et ε', il suffit de se référer à l'article précédent sur la relativité où après un simple calcul, c'est Einstein qui parle!, l'énergie de rayonnement mesurée dans le système stationnaire et l'énergie de rayonnement mesurée dans le système en mouvement peuvent être déduite l'une de l'autre.

Le calcul simple revient à calculer le rapport du volume de la sphère (système stationnaire) au volume de l'ellipsoïde (système en mouvement) contenant l'énergie lumineuse utilisant les transformations de Lorentz (paragraphe 8 de l'article relativité). L'énergie mesurée dans le système en mouvement est égale à l'énergie mesurée dans le système stationnaire multipliée par le facteur de Lorentz.

Le facteur de Lorentz peut se réduire aux termes du 1er et 2eme ordre du développement limité (approximation binomiale) lorsque la vitesse v reste petite par rapport à c … $1+1/2v^2/c^2+3/8v^4/c^4+\cdots$



- ☑ L'énergie est conservée
- ☐ La masse est conservée
- ☑ c invariant
- ☑ Principe de relativité

$E_1 = E_2 + \epsilon$ $\quad E_1' = E_2' + \epsilon'$

$K_{\text{avant}} = E_1' - E_1$

$K_{\text{après}} = E_2' - E_2$

$K_{\text{avant}} - K_{\text{après}} = \epsilon' - \epsilon$

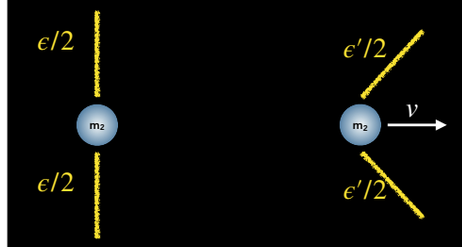
$$\epsilon' = \epsilon \times \left(1 + \frac{1}{2}\frac{v^2}{c^2}\right)$$

$$\frac{1}{2}m_1v^2 - \frac{1}{2}m_2v^2 = \frac{1}{2}\frac{v^2}{c^2}\epsilon$$

$$m_1 - m_2 = \frac{\epsilon}{c^2}$$

A. Einstein, Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhängig?, Annalen der Physik, vol. 323, 18, 1905

Comme la vitesse v est petite par rapport à c, on peut utiliser la définition classique de l'énergie cinétique : $K = 1/2mv^2$. m_1 est la masse du corps avant le rayonnement et m_2 la masse après rayonnement. On en déduit qu'une partie de la masse du corps (m_1 - m_2) a été transformée en rayonnement.



$E_1 = E_2 + \epsilon$ $\quad E_1' = E_2' + \epsilon'$

$K_{\text{avant}} = E_1' - E_1$

$K_{\text{après}} = E_2' - E_2$

$K_{\text{avant}} - K_{\text{après}} = \epsilon' - \epsilon$

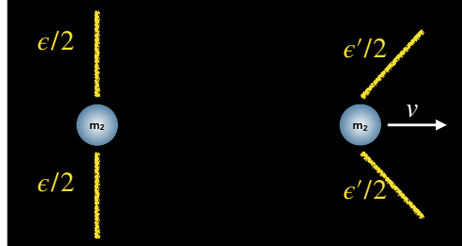
$$\epsilon' = \epsilon \times \left(1 + \frac{1}{2}\frac{v^2}{c^2}\right)$$

- ☑ L'énergie est conservée
- ☐ La masse est conservée
- ☑ c invariant
- ☑ Principe de relativité

$$m_1 - m_2 = \frac{\epsilon}{c^2}$$

A. Einstein, Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhängig?, Annalen der Physik, vol. 323, 18, 1905

« Si un corps perd une énergie ε sous forme de rayonnement, alors sa masse diminue d'une quantité ε divisé par c au carré ».



- ☑ L'énergie est conservée
- ☐ La masse est conservée
- ☑ c invariant
- ☑ Principe de relativité

$$E_1 = E_2 + \epsilon \qquad E_1' = E_2' + \epsilon'$$

$$K_{\text{avant}} = E_1' - E_1$$

$$K_{\text{après}} = E_2' - E_2$$

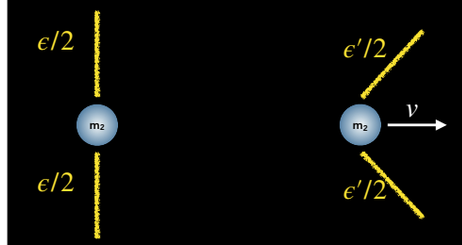
$$K_{\text{avant}} - K_{\text{après}} = \epsilon' - \epsilon$$

$$\epsilon' = \epsilon \times \left(1 + \frac{1}{2}\frac{v^2}{c^2}\right)$$

$$m_1 - m_2 = \frac{\epsilon}{c^2}$$

A. Einstein, Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhängig?, Annalen der Physik, vol. 323, 18, 1905

La démonstration d'Einstein s'appuie sur l'émission d'un rayonnement électromagnétique. Elle reste cependant valable quelle que soit la nature du « rayonnement », il pourrait tout aussi bien s'agir d'une émission de particules massives. En effet, la radioactivité de certains corps, découverte quelques années auparavant, s'explique par la dissociation de la matière et l'émission de particules animées de très grandes vitesses et de l'énergie électromagnétique. D'où ces particules prennent-elles leur énergie ? Elles l'empruntent à la matière.
D'ailleurs Einstein termine en disant que sa théorie pourrait être vérifiée avec l'étude de la radioactivité des sels de radium récemment découverte (radioactivité alpha/beta où la lumière n'intervient pas).



- ☑ L'énergie est conservée
- ☐ La masse est conservée
- ☑ c invariant
- ☑ Principe de relativité

$$E_1 = E_2 + \epsilon \qquad E_1' = E_2' + \epsilon'$$

$$K_{\text{avant}} = E_1' - E_1$$

$$K_{\text{après}} = E_2' - E_2$$

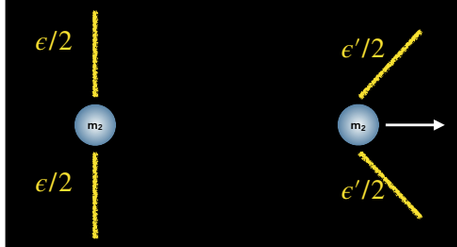
$$K_{\text{avant}} - K_{\text{après}} = \epsilon' - \epsilon$$

$$\epsilon' = \epsilon \times \left(1 + \frac{1}{2}\frac{v^2}{c^2}\right)$$

$$m_1 - m_2 = \frac{\epsilon}{c^2}$$

A. Einstein, Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhängig?, Annalen der Physik, vol. 323, 18, 1905

Un corps qui perd de l'énergie, quelque soit la forme de cette énergie, perd aussi de la masse et cela même si le corps émet des objets sans masse ! La masse n'est donc plus conservée !



- ☑ L'énergie est conservée
- ☐ La masse est conservée
- ☑ c invariant
- ☑ Principe de relativité

$$E_1 = E_2 + \epsilon \qquad E_1' = E_2' + \epsilon'$$

$$K_{\text{avant}} = E_1' - E_1$$

$$K_{\text{après}} = E_2' - E_2$$

$$K_{\text{avant}} - K_{\text{après}} = \epsilon' - \epsilon$$

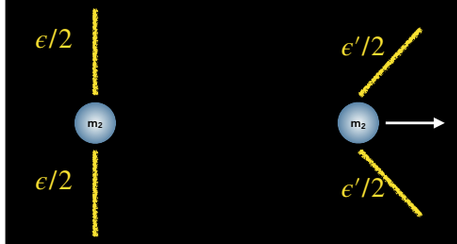
$$\epsilon' = \epsilon \times \left(1 + \frac{1}{2}\frac{v^2}{c^2}\right)$$

$$m_1 - m_2 = \frac{\epsilon}{c^2}$$

$$m_2 = 0 \rightarrow E_2 = 0$$

A. Einstein, Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhängig?, Annalen der Physik, vol. 323, 18, 1905

La quantité d'énergie maximum que le corps peut rayonner est celle lorsque la masse du corps dans l'état final est nulle ($m_2 = 0$). m_2 étant nul, E_2 également est nul, et $E1 = \varepsilon$



- ☑ L'énergie est conservée
- ☐ La masse est conservée
- ☑ c invariant
- ☑ Principe de relativité

$E_1 = E_2 + \epsilon$ $\quad E_1' = E_2' + \epsilon'$

$K_{\text{avant}} = E_1' - E_1$

$K_{\text{après}} = E_2' - E_2$

$K_{\text{avant}} - K_{\text{après}} = \epsilon' - \epsilon$

$$\epsilon' = \epsilon \times \left(1 + \frac{1}{2}\frac{v^2}{c^2}\right)$$

$$m_1 - m_2 = \frac{\epsilon}{c^2}$$

$m_2 = 0 \rightarrow E_2 = 0$

$$m_1 = \frac{E_1}{c^2}$$

A. Einstein, Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhängig?, Annalen der Physik, vol. 323, 18, 1905

d'où : $m_1 = E_1/c^2$. Et ceci est la réponse à la question posée dans le titre de l'article : est-ce que l'inertie d'un corps dépend de son contenu en énergie ? OUI!

«La masse d'un corps est une mesure de son contenu en énergie; si son énergie change de E_1, alors sa masse change aussi de E_1/c^2 »

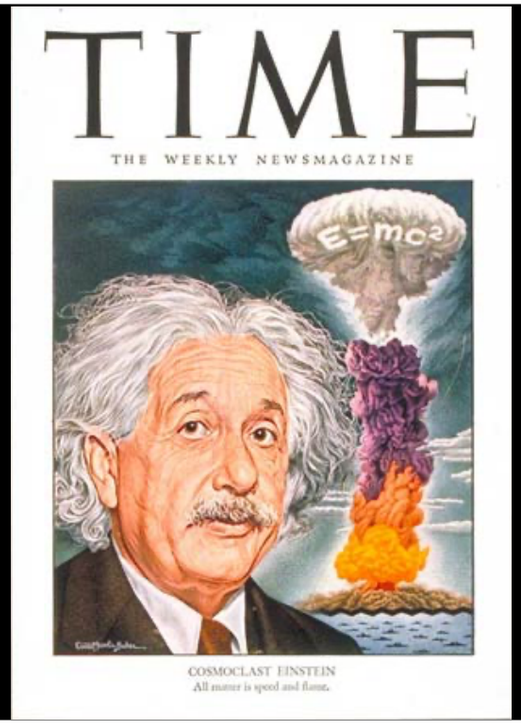
Ce qui implique que le c de l'équation ne doit pas être compris comme la vitesse de la lumière mais comme une constante universelle de la physique qui intervient dans tous les processus dans lesquels de l'énergie est mise en jeu même si aucune lumière n'intervient dans l'affaire.

Pourquoi $E = Mc^2$?

Nous avons donc répondu à la question posée … ou plutôt Albert Einstein y a répondu.

$$E = Mc^2$$

Une première remarque s’impose : nous pourrions lire cette équation comme la possibilité de changer de la masse pour de l’énergie ou vice-versa et que le taux de change est de c^2. Mais comme tout taux de change, il pourrait prendre n’importe quelle valeur … à condition de bien choisir les unités pour E et pour M ou plus précisément comme nous l’avons évoqué lors du troisième cours en choisissant de façon appropriée l’unité de longueur et l’unité de temps nous aurions bien pu avoir c=1 et c disparaitrait de l’équation ce qui la rendrait bien plus explicite, E=M. c doit donc bien être considéré comme une constante universelle dont la valeur dépend (malheureusement) de nos choix historiquement fondés des unités de mesure. Et la Nature de notre univers impose qu’il existe une vitesse maximale qu’aucun objet massif ne pourra jamais atteindre, la seule vitesse possible des objets de masse nulle, la vitesse d’une onde électromagnétique telle la lumière ou la vitesse d’une onde gravitationnelle.



1 juin 1946

La deuxième remarque est que, selon cette même lecture de l'équation, tout corps contient potentiellement une quantité énorme d'énergie. A titre d'exemple, un corps de masse égale à 50 kg possède une énergie interne égale à environ $5x10^{18}$ joules soit 1 giga tonne équivalent TNT, ou encore 100.000 fois l'énergie libérée par la première bombe atomique.

Lecture détournée qui fait fantasmer les journalistes … et le public non averti.

Mais avant de déduire le potentiel explosif de cette équation, écoutons plutôt ce que Einstein a voulu nous dire.

Cosmoclast = destructeur de l'ordre
All matter is speed and flame = toute la matière est explosion et feu

$$M = E/c^2$$

La masse d'un corps est une mesure de son contenu en énergie; si son énergie change d'une quantité E, sa masse change d'une quantité E divisée par c^2

A. Einstein, Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhängig?, Annalen der Physik, vol. 323, 18, 1905

Notez qu'Einstein n'écrit pas $E = mc^2$ mais $m = E/c^2$. Einstein suggère ainsi que l'énergie interne d'un corps est à l'origine se la masse, c'est la réponse à la question posée en titre de l'article : l'inertie d'un corps dépend-t-elle de son contenu en énergie … Il ne cherche pas à suggérer l'inverse que l'énergie peut s'exprimer en terme de masse : Einstein fait de la physique fondamentale, il ne cherche pas à faire une bombe.

Nous voilà donc avec LA définition de la masse : la masse d'un corps est une mesure de son contenue en énergie.

L'histoire de la physique attribue la paternité de l'équation à Einstein, même si avant lui d'autres l'aient suggérée.
En effet, à la fin du 19ème siècle, l'idée de l'équivalence énergie-matière était dans l'air du temps, voire plus tôt encore. Je ne me lancerai pas dans la dispute pour savoir qui est le vrai père de la célèbre formule voire même le vrai père de la relativité restreinte. Mais que cela ne m'empêche pas de citer quelques noms parmi les quelques pères putatifs qui ont précédé Einstein.

$E = Mc^2$?

-1732 : Isaac Newton



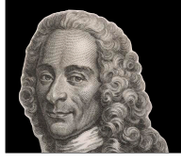
Traité d'Optique, Questions XXX p.551, 1732

Newton et équivalence matière - énergie : Newton suggère l'idée d'une transformation réciproque entre la matière et la lumière, « Ne peut-il pas se faire une transformation réciproque entre les corps grossiers et la lumière ? […] Le changement des corps en lumière et de la lumière en corps est une chose très conforme au cours de la Nature qui semble se plaire aux transformations » dans Traité d'Optique, Questions XXX p. 551, 1732 (https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bd6t5737817j/f2.item)

$E = Mc^2$?

-1732 : Isaac Newton

-1738 : Voltaire



Eléments de la philosophie de Newton mis à la portée de tout le monde (1738)

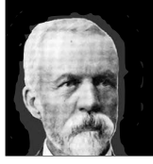
Voltaire en adoptant la formule de la force vive de Leibniz (= m x v^2) et en reprenant cette idée de Newton ainsi que l'hypothèse des « corpuscules de lumière » en déduit que la force vive d'un grain de lumière est égale à la masse de ce grain multipliée par sa vitesse au carré. Il compare la force vive de la lumière à celle d'un boulet de canon : « Si donc une seule particule de lumière agit en raison du carré de sa vitesse et si cette vitesse est environ seize cens mille par rapport à celle du boulet de canon, ce carré fera 2.560.000.000.000 [3.5×10^{12}) ; il sera donc vrai que, si cet atome n'est que de deux miliasses cinq cens soixante milliards moins gros qu'une livre, il fera encore le même effet qu'un boulet de canon » dans Eléments de la philosophie de Newton mis à la portée de tout le monde (1738).

$E = Mc^2$?

-1732 : Isaac Newton

-1738 : Voltaire

-1875 : Samuel Preston



Physics of the Ether, 1875

En 1875, l'ingénieur-physicien anglais Samuel Preston publie un ouvrage, Physics of the Ether, dans lequel il discute de sa vision de la matière et de l'éther : l'éther est constitué de particules et la matière c'est de l'éther concentré. Il postule que l'énergie d'une particule de m_e est égale à m_e x c^2, ainsi de la matière de masse M en se transformant en de l'éther peut donner à l'éther une énergie M x c^2.

$E = Mc^2$?

-1732 : Isaac Newton

-1738 : Voltaire

-1875 : Samuel Preston

-1904 : Olinto De Pretto



Ipotesi dell'Etere nella vita dell'Universo, *Atti del Reale Istituto Veneto di Scienze, Lettere ed Arti*, (1904) vol. LXIII, parte II, pp.439-500

Olinto De Pretto, un industriel italien, publie l'équation $E=mc^2$ dans un compte rendu à l'Institut Royal Vénitien des Sciences intitulé *Ipotesi dell'Etere nella vita dell'Universo,* équation déduite d'un cheminement de pensée similaire à celui de Preston et suggère que l'éther est l'origine de toute l'énergie que l'on trouve dans la matière.

« La matière de n'importe quel corps contient en elle-même une quantité d'énergie représentée par la masse entière du corps, se déplaçant toute ensemble et en bloc dans l'espace, avec la même vitesse que les particules individuelles. (...) La formule mv^2 nous donne l'énergie cinétique et la formule $(mv^2)/8338$ nous donne, exprimée en calories, cette énergie. Ainsi, en prenant m=1 et v égal à 300 millions de mètres, qui est la vitesse de la lumière, également admise pour l'éther, chacun pourra voir qu'on obtient une quantité de calories représentée par 10974 suivi de 9 zéros, c'est-à-dire plus de dix millions de milliards. À quel résultat terrifiant nous a conduit notre raisonnement ? Personne ne voudra facilement admettre qu'emmagasinée et à l'état latent, dans un kilogramme de n'importe quelle matière, complètement cachée à toutes nos investigations, se dissimule une telle quantité d'énergie, équivalente à celle qui peut être produite par des millions et des millions de kilogrammes de charbon ; cette idée sera certainement jugée folle »
http://www.cartesio-episteme.net/st/mem-depr-vf.htm#:~:text=Si può immaginare che ogni,spazio e secondo infinite direzioni.

E = Mc² ?

-1732 : Isaac Newton

-1738 : Voltaire

-1875 : Samuel Preston

-1904 : Olinto De Pretto

-1905 : Gustave Le Bon



L'Evolution de la Matière, Flammarion 1905

En 1905 dans un ouvrage intitulé « L'évolution de la matière », le médecin anthropologue sociologue français Gustave Le Bon qui par ailleurs a diffusé des théories racistes et sexistes à oublier, spécule que « La matière et l'énergie sont deux choses identiques sous des aspects différents » et qu'une quantité considérable d'énergie, prisonnière dans la matière sous forme d' « énergie inter atomique », pourrait être libérée lorsque la « matière se dématérialise ».

$E = Mc^2$?

-1732 : Isaac Newton

-1738 : Voltaire

-1875 : Samuel Preston

-1904 : Olinto De Pretto

-1905 : Gustave Le Bon

- 1900 : Henri Poincaré



La théorie de Lorentz et le principe de réaction, Arch. Néerl. Sci. Ex. et Nat. vol. 5

Ce sera Henri Poincaré qui fera un premier pas vers la démonstration rigoureuse de l'équation $E=mc^2$ en démontrant que la lumière possède une certaine inertie, le coefficient inertie étant la définition que la dynamique donne de la masse : « L'énergie électromagnétique se comportant donc au point de vue qui nous occupe comme un fluide doué d'inertie, on doit conclure que si un appareil quelconque après avoir produit de l'énergie électromagnétique, l'envoie par rayonnement dans une certaine direction, cet appareil devra reculer comme recule un canon qui a lancé un projectile. » dans La Théorie de Lorentz et le principe de réaction (1900)

Démonstration de Poincaré :

- Energie électromagnétique E -> la densité d'impulsion contenue dans un champ électromagnétique est égale au vecteur de Poynting divisé par c et le vecteur de Poynting (P = E X H) représente la quantité d'énergie électromagnétique qui traverse une surface S durant un temps donné (théorème de Poynting) : donc densité d'impulsion = E/c
- Si m est la masse de l'objet qui envoie le rayonnement électromagnétique, par conservation de la quantité de mouvement, l'objet doit reculer avec une vitesse v : mv = E/c.
- Considérant que m_i est la masse du fluide fictif que constitue le flux électromagnétique qui se propage à la vitesse c, il aurait pu poser $mv = m_ic$ et il aurait bien obtenu $E = m_ic^2$.

$E = Mc^2$?

-1732 : Isaac Newton

-1738 : Voltaire

-1875 : Samuel Preston

-1904 : Olinto De Pretto

-1905 : Gustave Le Bon

- 1900 : Henri Poincaré

- 1905 : Friedrich Hasenöhrl



Zur Theorie des Strahlung in bewegten Körper, Annalen der Physik 15, 344–370, **1904**

En 1905, Friedrich Hasenöhrl calcule la variation de masse d'un corps lorsqu'il absorbe de l'énergie calorique et trouve qu'elle est égale à $4/3E/c^2$ où E est l'énergie électromagnétique absorbée. S'il ne s'était pas trompé dans ses calculs, il aurait bien trouvé E/c^2.

$$M = E/c^2$$

La masse d'un corps est une mesure de son contenu en énergie; si son énergie change d'une quantité E, sa masse change d'une quantité E divisée par c^2

A. Einstein, Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhängig?, Annalen der Physik, vol. 323, 18, 1905

Par énergie (interne d'un corps), il faut entendre la somme totale de l'énergie cinétique des parties du corps, c'est-à-dire l'énergie liée aux mouvements (translation, rotation, vibration, etc…), et de son énergie potentielle, c'est-à-dire la capacité de faire un travail, qui intervient lorsque les parties d'un corps interagissent entre elles.

Par masse, il faut entendre inertie. L'équation nous apprend que l'inertie d'un corps EST le contenu en énergie de ce corps.

Ainsi chaque fois qu'on extrait de l'énergie d'un système, son inertie (c'est-dire sa résistance à accélérer … ou ralentir) diminue c'est-à-dire il perd de la masse.

Cependant du fait de la grande valeur numérique de c, à notre échelle cette perte de masse reste très faible. Ainsi une boule de fer chauffée à 1000K, en se refroidissement à la température ambiante perdrait une masse d'environ 10 ng … il faut déjà avoir une bonne balance.

Dans la vie de tous les jours où les processus mettent en jeu de l'interaction électromagnétique (combustion du carbone $C + 2O \rightarrow CO_2 +$ énergie), ce changement de masse n'est pas perceptible, mais il existe. Au niveau du noyau atomique où les processus sont gouvernés par l'interaction forte, les quantités d'énergie mises en jeu étant jusqu'à 1 million de fois plus importantes, les pertes de masse sont mesurables et non sans conséquences macroscopiques. C'est là l'origine de cette association fausse de l'équation à l'énergie nucléaire.

Matière, énergie, interactions

Pour obtenir 1 kWh :

Interaction	Quantité de matière (kg) / Elément	Mécanisme
Forte	10^{-9} H	fusion
	10^{-6} U	fission
EM	10^{-1} fossile	combustion
Gravitationnelle	10^{4} eau	chute de 40 m
	$2{,}7 \times 10^{4}$ air	éolienne 60 km/h

1 kWh permet de faire fondre 10 kg de glace ou de faire bouillir 1,5 kg d'eau
De même 1 kWh est l'énergie cinétique d'un camion de 10 tonnes roulant à 100 km/h = 1 bon repas

Pour libérer 1 kWh (3600 kJ), il suffit de 5µg d'hydrogène dans le Soleil, de 10 mg d'uranium naturel dans nos réacteurs (100 fois moins dans les surgénérateurs en projet). Les énergies les plus courantes, électrique, lumineuse, chimique, biochimique, calorifique, élastique, ont à l'échelle microscopique la même nature électromagnétique. Les masses en jeu pour libérer 1 kWh sont ici de l'ordre du kg : 1 kg de pétrole équivaut à 12 kWh (de même pour les autres carburants, gaz ou charbon) ; une batterie au plomb stocke 0,35 kWh par kg ; la puissance du rayonnement solaire est de l'ordre de 1 kW par m² au maximum. Enfin, l'énergie de pesanteur et l'énergie cinétique, liées à la gravitation, sont extrêmement diluées (gravité et mouvement sont unifiés par la relativité générale). Pour produire 1 kWh d'énergie électrique dans une usine hydroélectrique, il faut faire chuter 10 tonnes d'eau de 40 m ; avec une éolienne, il faut récupérer l'énergie cinétique de 20 000 m3 d'air (27 tonnes) arrivant à 60 km/h.
4m2 de panneaux solaires pour produire 1kWh, s'il y avait une ensoleillement optimum 24h/24

$$E = Mc^2$$

$$E = h\nu$$

Vous pourriez à ce stade vous inquiétez que pour la lumière constituée de photons, particule de masse nulle, l'équation $E=Mc^2$ donnerait aux photons une énergie nulle. Or nous savons par Planck/Einstein que l'énergie d'un photon est égale à hv, la constante de Planck multipliée par la fréquence de l'onde lumineuse. Où est le problème ? C'est que je ne vous ai pas tout dit. Rappelez vous que le M dans $E=Mc^2$ est la masse mesurée dans le référentiel où la particules est au repos, or d'après le principe de relativité une particule de masse nulle de déplace à la vitesse de la lumière et il ne peut exister de référentiel où une particule de masse nulle serait au repos (dans un tel référentiel, la lumière serait à la fois au repos et se déplacerait à la vitesse de la lumière dans le vide qui par principe est invariante c'est-dire la même pour tout observateur).

$$E = \sqrt{p^2c^2 + m_0^2c^4}$$

$$E = h\nu$$

Il faut donc invoquer l’équation complète décrivant l’énergie d’une particule en mouvement : $E^2 = p^2c^2 + m_0^2c^4$ où p est l’impulsion relativiste de la particule et m_0 sa masse au repos.

$$E = \sqrt{p^2c^2 + m_0^2c^4}$$

$$E = h\nu$$

$$m_0 = 0$$

$$\Rightarrow \quad p = \frac{h\nu}{c}$$

Ainsi pour le photon de masse nulle, l'énergie donnée par l'équation relativiste sera égale à pc ($m_0 = 0$) et l'on pourra retrouver la relation de de Broglie décrivant la propriété corpusculaire du photon (impulsion) à sa propriété ondulatoire (ν) : $p = h\nu/c$.
Pour une particule de masse non nulle et au repos (p=0) on retrouve bien notre équation, $E=m_0c^2$. Ouf sauvés !
Et avec un peu d'adresse arithmétique, on pourra retrouver l'expression classique de l'énergie cinétique ($E=1/2m_0v^2$) pour une particule se déplaçant à une vitesse faible par rapport à la vitesse de la lumière.

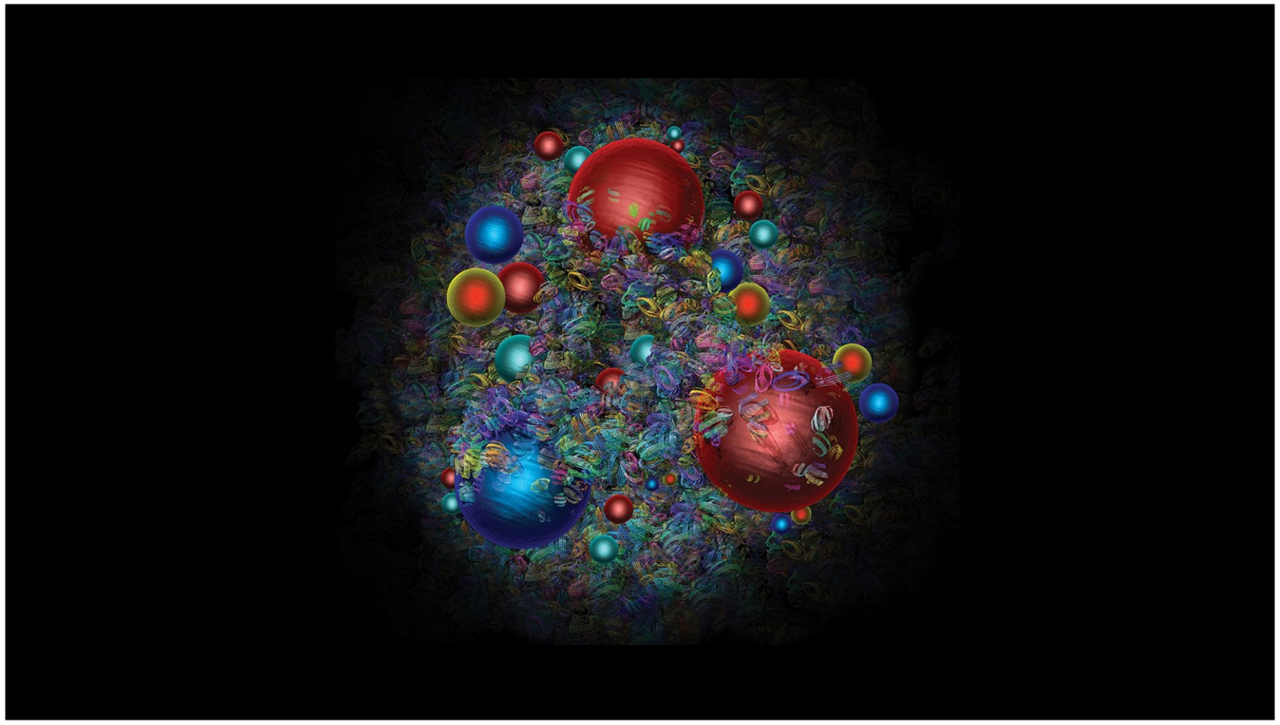
Origine de la masse

$E=mc^2$ remet en question l'origine de la masse.

Nous avons vu lors du deuxième cours consacré au M pour masse, que la mécanique classique de Newton est inconcevable sans la notion de masse. La deuxième loi de Newton (F=ma) n'aurait aucun sens pour un corps sans masse qui ne saurait comment se mouvoir et des corps sans masse ne sauraient graviter.

Et que nous suggère Einstein ? La possibilité de chercher l'origine de la masse dans de l'énergie ! Plongeons dans l'infiniment petit et cherchons de quoi la masse est-elle concrètement le nom. Depuis 1906, et l'expérience de Jean Perrin (voir mon cours d'il y a deux ans), nous savons que le matière ordinaire est faite d'atomes. Rutherford nous a appris en 1909 que l'essentiel de la masse de l'atome est concentrée dans le noyau, les électrons ne contribuant quasiment pas à la masse de l'atome. En scrutant d'avantage encore l'atome nous avons appris que les constituants ultimes de la matière sont les quarks qui de plus est sont sans masse ne serait le champ de Higgs. Ainsi donc des particules sans masse, qui acquièrent de l'inertie en interagissant avec l'indispensable champ de Higgs seraient à l'origine de la masse de la matière ordinaire ? Nous avons vu, il y a deux semaines, que la contribution (à peine 1%) des quarks est largement insuffisante pour expliquer la masse des protons et des neutrons. Alors pourquoi pesons-nous autant ? « Le tout est plus grand que la somme de ses parties » aurait répondu Aristote.

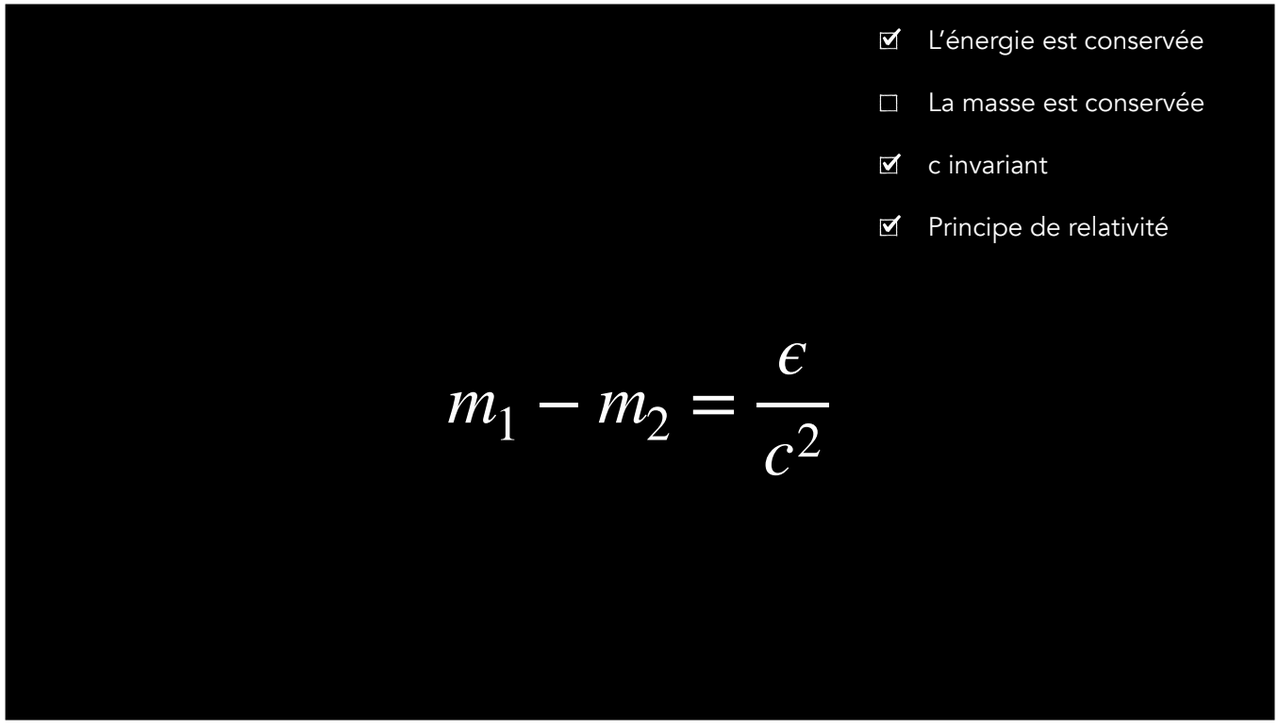
Nous devons notre masse à l' interaction forte qui lie les quarks en des objets composites comme le proton et le neutron. Nous avons vu (cours des années précédentes) que cette interaction s'exprime, dans le cadre de la théorie des jauges et de la mécanique quantique des champs par l'échange de gluons, particules elles aussi de masse nulle mais au contraire des quarks insensibles au champs de Higgs.



Ce qui donne de la structure du proton l'image d'une folle sarabande (énergie cinétique) de quarks et de gluons, les uns réels, les autres virtuels que l'énergie déployée par l'interaction forte (énergie d'interaction) contraint dans les limites du petit volume du proton.
La masse d'un objet (le proton par exemple) est ainsi la somme des masses au repos des constituants (les quarks). Comme nous venons de l'apprendre qu'énergie et masse sont interchangeables, il faut y ajouter l'énergie qui lie les constituants entre eux (véhiculée par des particules sans masse, les gluons) ainsi que leur énergie cinétique. En faisant le bilan des différentes contributions à la masse du proton, nous trouvons que l'énergie potentielle est à l'origine de l'essentiel (99%) de la masse du proton, et donc de tout objet, alors que la masse des particules élémentaires n'y contribuent que très peu (1%).

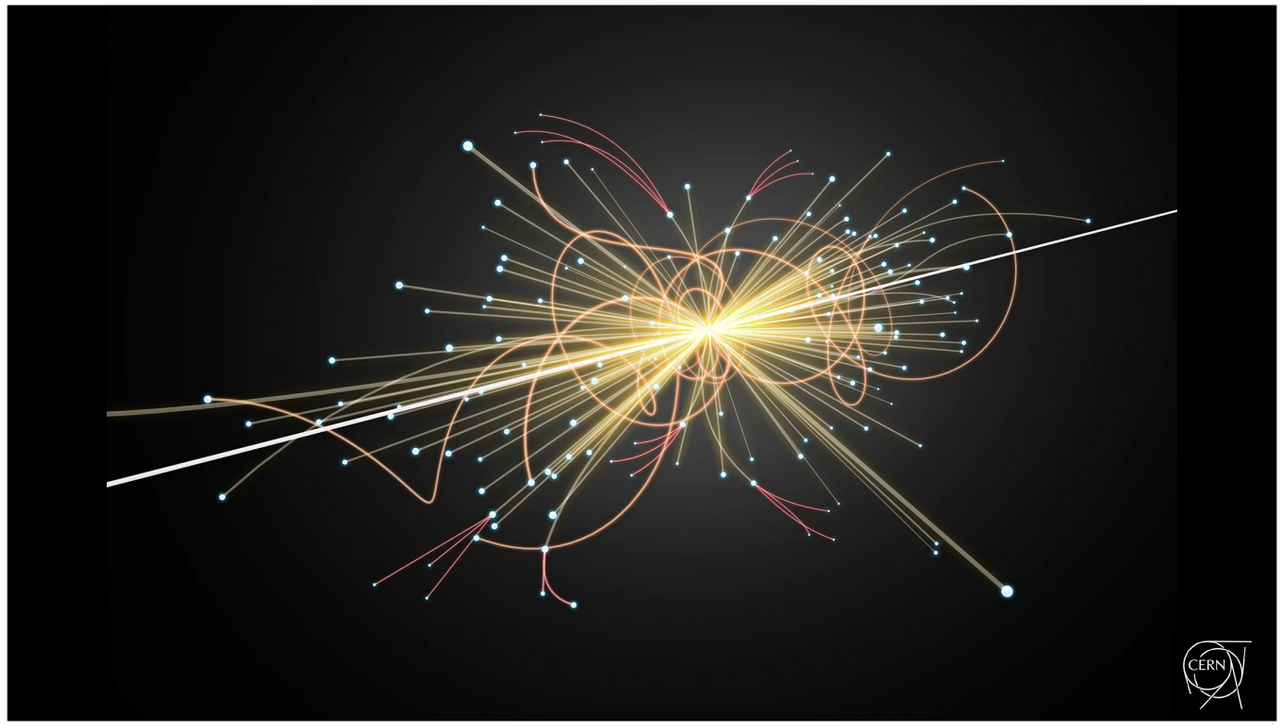
D'où nous concluons que la Nature nous a fait essentiellement immatériels, nous devons notre masse à des particules sans masse !

Serait-ce donc la fin de la matière, question qu'a anticipée Henri Poincaré dans la Science et l'hypothèse en 1902 : « Si donc on venait à démontrer que la masse, l'inertie de la matière ne lui appartiennent pas en réalité, que c'est un luxe d'emprunt dont elle se pare, que cette masse, la constante par excellence, est elle-même susceptible d'altération, on pourrait bien dire que la matière n'existe pas. »



Vous aurez certainement remarqué que je n’ai pas coché toutes les cases. Cette équation me dit qu’un corps qui perd de l’énergie perd de sa masse dans la proportion de 1/c2. La masse ne serait donc pas conservée ? Einstein le supputait mais aujourd’hui nous en sommes certain : il est possible de détruire et de créer de la masse.

Nous avions déjà vu lors du cours de l’année dernière, que dans les années trente Frédéric Joliot et Irène Curie avait démontré la possibilité de créer de la matière : création d’une paire d’électron-positron à partir du choc d’un rayon gamma sur un noyau. Inversement la matière pouvait être détruite quand une particule rencontre son anti particule.



Mais cette image illustrant la création de matière me semble plus parlante, une parfaite illustration de $m = E/c^2$. Lorsque un proton rencontre un proton chacun accéléré à la vertigineuse vitesse de 99.9999986% de la vitesse de la lumière, la densité d'énergie créée est telle qu'une nuée de particules émergent du point d'interaction. La masse totale des particules ainsi créées est des milliers de fois supérieures à la masse des deux protons à l'origine de la collision. De la masse a été effectivement créée à partir de la seule énergie.

Définitivement la masse a perdu son statut de quantité conservée !

Fission & fusion

Sans doute, fission et fusion sont les concepts qui viennent spontanément à l'esprit de la plupart lorsque confronté à $E = mc^2$. La quantité d'énergie contenue dans la matière est si phénoménale qu'homo industrialis, toujours plus avide d'énergie, ne peut s'empêcher de rêver à son exploitation.
Mais comment extraire cette énergie de la matière … voici l'histoire. Il faudra attendre plus de trente après l'article d'Einstein pour que, par hasard, un moyen d'extraire cette énergie de la matière soit découvert.

1934

Enrico Fermi

Découverte de l’élément 93 ?



E. Fermi, Possible Production of Elements of Atomic Number Higher than 92, Nature 133 (1934)

Nous sommes en 1934, Irène Curie et Frédéric Joliot venait de découvrir la radioactivité artificielle, c’est-à-dire la production d’isotopes radioactifs par bombardement d’une feuille d’Al avec des particules alpha. La course aux nouveaux isotopes était lancée, sans arrière pensée pour une éventuelle application pratique, mais pour le simple plaisir de découvrir de nouveaux éléments et qui sait être récompensé par le prix Nobel. La bande à Fermi de la via Panisperna à Rome choisit de remplacer les alpha par des neutrons, le neutron venait d’être découvert en 1932 par Chadwick, électriquement neutres et donc mieux à même de pénétrer le noyau et bombarde toute sorte de matériau. Ils découvrent ainsi une vingtaine de nouveaux isotopes. Lorsque vient le tour de l’Uranium, le plus lourd des éléments connus à l’époque, ils découvrent ou plutôt pensent découvrir deux nouveaux éléments radioactifs Z = 93 et Z = 94 qu’il appela Ausinium (d’après un nom grec de l’Italie) et Hespérium (d’après un nom poétique de l’Italie). Le patron du labo lui suggère alors de baptiser ce nouvel élément Mussolinium mais Fermi lui fait remarquer ironiquement que vu la durée de vie du nouvel élément cela pourrait vexer le duce. Ils constatent ensuite que si les neutrons sont préalablement ralentis en leur faisant traverser une feuille de paraffine, ils étaient plus efficaces pour créer de l'activité dans la cible que les neutrons rapides : les neutrons lents sont plus aisément capturés par le noyau d’Uranium que le sont les neutrons rapides. Cette dernière découverte, essentielle pour la production d’énergie, value à Fermi le prix Nobel en 1938 : « Pour ses démonstrations de l'existence de nouveaux éléments radioactifs produits par l'irradiation neutronique, et pour la découverte corrélative des réactions nucléaires causées par les neutrons lents. »
Cependant l’interprétation était fausse.



C’est une chimiste allemande qui contesta la première l’interprétation de Fermi, Ida Noddack qui déjà en 1925 avait découvert avec son mari l’élément 75 qu’ils appelèrent le Rhenium (Ida est née dans le land du Rhin). En 1934, elle remet d’abord en cause l’identification des éléments produits par Fermi, pointant le fait qu’avec sa méthode Fermi ne pouvait en aucun cas identifier des éléments plus légers que l’élément de la cible. Fermi avait effectivement un a-priori sur ce qu’il voulait trouver et avait ajusté les conditions expérimentales en conséquence … en enveloppant l’échantillon irradié d’une feuille d’aluminium pour masquer les particules alpha issues de la radioactivité naturelle de l’uranium. Ce faisant, il masquait également les particules alpha issues de la radioactivité de tous les éléments plus légers que l’Uranium.
Parallèlement à l’équipe de Fermi, un ingénieur tchèque, Odolen Koblic, avait lui aussi cru découvrir l’élément 93 et l’avait baptisé Bohemium. Contrairement à Fermi, il avait donné suite à la demande de Ida Noddack en lui envoyant un échantillon d’Uranium irradié. Suite à une analyse chimique détaillée, elle n’y trouva aucune trace de l’élément 93, mais au contraire un mélange d’Argent (Z=47), de Thallium(Z=81), de Vanadium (Z=23) et de Tungstène(Z=74).
Elle émet ensuite l’hypothèse que l’on pourrait envisager que le noyau cible se casse en plusieurs fragments qui seraient des isotopes d’éléments connus mais ne seraient en aucune façon des éléments de masse proche de l’élément irradié. Ne pouvant apporter de preuves expérimentales, ni proposer une théorie sur laquelle fonder son hypothèse, étant de plus une femme, qui, selon la loi allemande en 1934, n’avait sa place qu’en tant que Hausfrau, son interprétation sera ignorée pendant plusieurs années.

1938

Irène Curie & Paul Savitch

Peut-être un transuranien



Curie, I. et Savitch, P., Sur les radioéléments formés dans l'uranium irradié par les neutrons, J. Phy. Radium, vol. 8, 10 (1937)

Entre 1934 et 1938, l'équipe parisienne Curie-Savitch répète les expériences de l'équipe Fermi et trouvent beaucoup de nouveaux radio-isotopes, tout en étant intrigués par la présence d'éléments beaucoup plus légers que l'Uranium, présence dont ils ne s'expliquent pas l'origine. Ils écrivent dans un article publié dans le Journal du Radium en septembre 1938 : « Il se forme dans l'uranium irradié par les neutrons lents ou rapides, un radioélément de période 3,5 h qui possède des propriétés chimiques semblables à celles du lanthane (Z=57). Ce radioélément est produit en quantité comparable à celle des corps transuraniens déjà connus ; c'est probablement aussi un corps transuranien mais on ne peut décider pour le moment le nombre atomique qu'il convient de lui attribuer. » La possibilité de casser le noyau d'Uranium suggérée par Ida Naddack reste lettre morte.

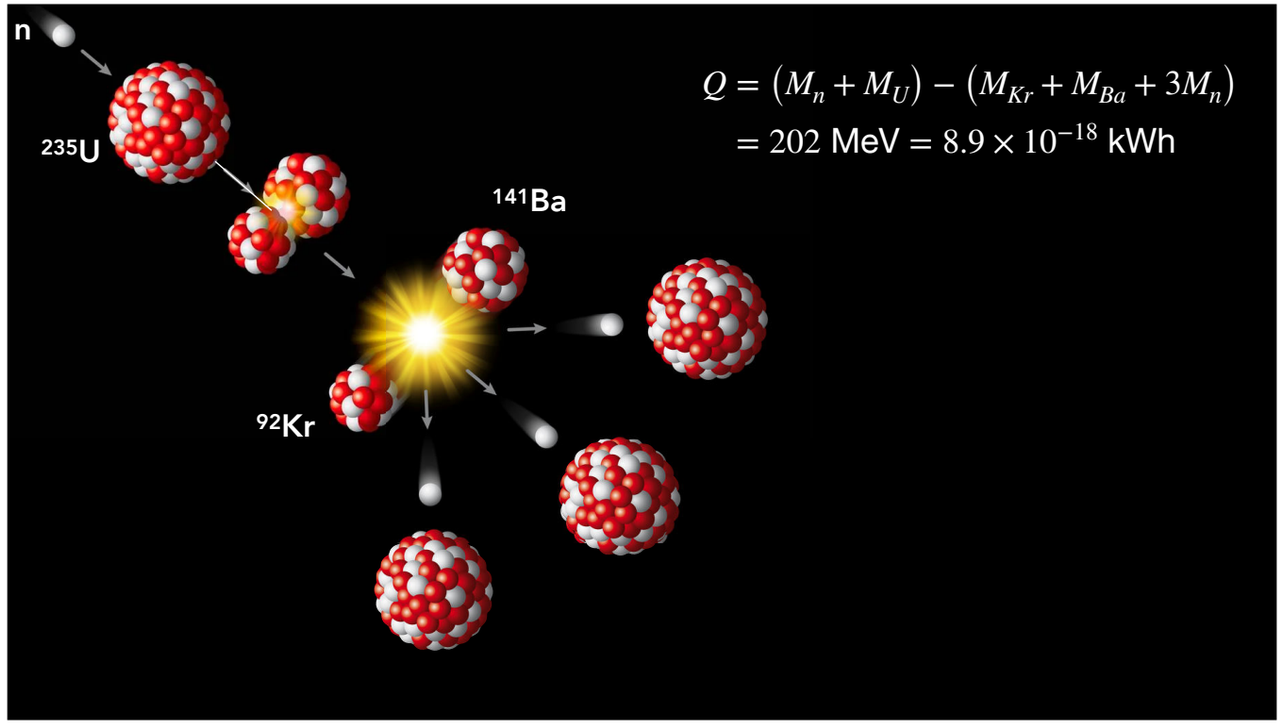


Il faudra l’intervention de chimistes (!) pour identifier les produits de réaction, lorsque des neutrons bombardent une feuille de d’Uranium, le chimiste prussien Otto Hahn et le chimiste rhénan Fritz Strassmann. Ils font une analyse radiochimique méticuleuse des produits de la réaction et découvrent la présence de Baryum (Z=56) et d’autres éléments bien plus légers. Ils constatent par exemple que la somme des masses du Baryum (A = 138) et du Technecium (A=101) donne 239, c’est-à-dire un neutron ajouté à Uranium 238. De là ils concluent prudemment que la présence de ces éléments pourrait être due à une « rupture » de l’uranium. Ils restent cependant très prudents : « En tant que "chimistes nucléaires" ayant une certaine affinité avec la physique, nous ne pouvons pas encore nous résoudre à faire ce saut qui va à l'encontre de toutes les expériences antérieures en physique nucléaire. Cependant, il est possible qu'une série d'étranges coïncidences ait pu simuler nos résultats. » L’article soumis en décembre 1938, sera publié en 1939 avec le titre « Sur la détection et les caractéristiques des métaux alcalino-ferreux formés par irradiation de l’uranium avec des neutrons ». Avec cet article, homme industrialis entre dans l’ère nucléaire.



Mais n’oublions pas Lise Meitner victime des vicissitudes de l’histoire. Physicienne, née à Vienne en Autriche, elle se rendit à Berlin pour suivre les cours de Max Planck en 1907 après sa thèse. Elle y rencontra Otto Hahn et ensemble ils découvrirent quelques radio-isotopes et se lièrent d’une amitié qui résista aux tourments de l’Allemagne nazie. Elle initia dès 1934 avec Hahn et Strassmann le projet de recherche uranium qui devait conduire à la découverte de la fission. Après avoir fui l’Allemagne en 1938 pour se réfugier à Copenhague, Meitner continua à collaborer avec Hahn (le télétravail de l’époque se résumait à des échanges de courriers, ceux que le préposé des postes met dans votre boite aux lettres devant chez vous, et à des rencontres clandestines). Ensemble ils préparèrent les expériences à réaliser et Meitner était tenue au courant des résultats et de la publication de Hahn et Strassmann, publication dont elle n’a pas pu être co-auteure mais où son nom est cité pour faire référence aux travaux antérieurs. Lorsque Hahn lui fait part du résultat des expériences, Lise Meitner et son neveu Otto Fritsch rédige immédiatement un article, publié en février 1939, qui explique l’origine des éléments très éloignés de l’uranium et inventent le mot fission.

« Il semble ainsi possible que le noyau d’uranium ait une forme très instable et qu’après avoir capturé un neutron se divise en deux noyaux de taille à peu près identique […]. Ces deux noyaux vont se repousser mutuellement et acquérir une énergie cinétique totale d’environ 200 MeV […] La totalité du processus de « fission » peut ainsi être décrite de façon classique, sans avoir besoin de recourir à des effets « tunnel » quantique […] »



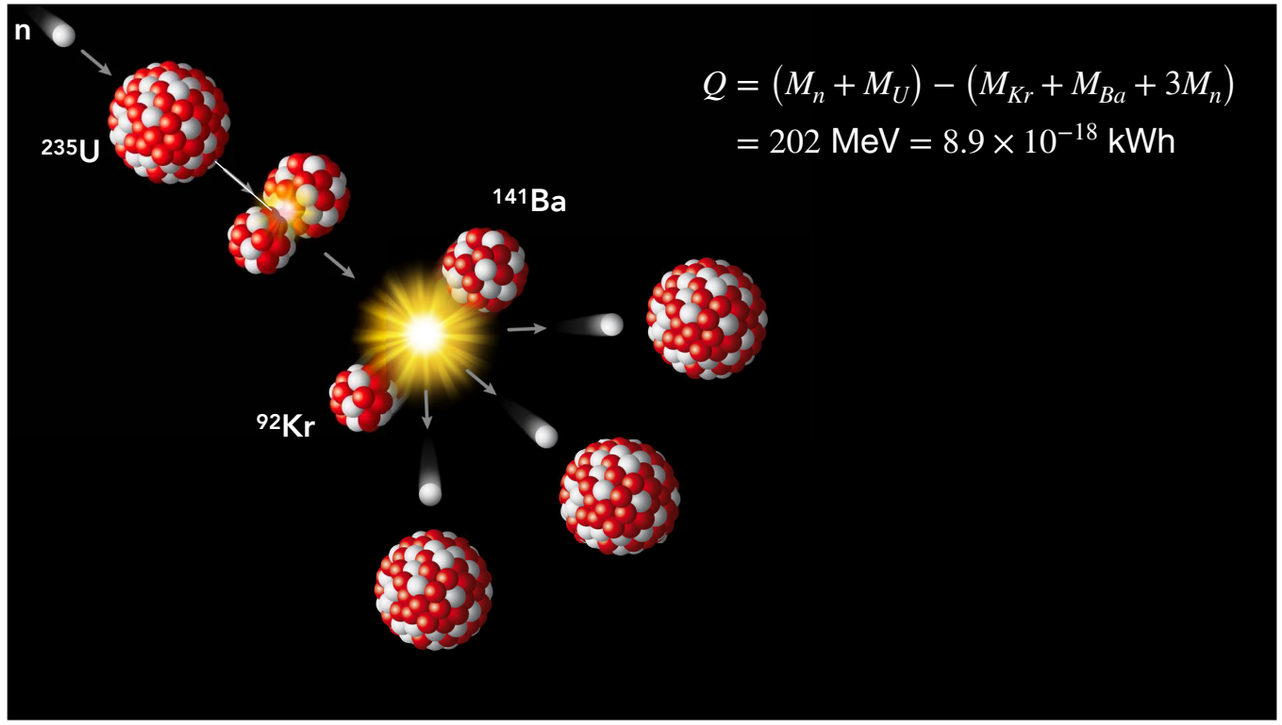
En image l’explication de Meitner est la suivante. Le noyau d’Uranium 235 capture un neutron, ce qui a pour effet de lui donner une forme très instable (goutte liquide) et d’induire la cassure en deux du noyaux d’uranium 236, les noyaux produits ajustent leur rapport Z/A pour assurer leur stabilité, ce qui génère un excès de neutrons qui sont ainsi produits (en moyenne 3) avec les les produits de fission. L’énergie excédentaire (différence des masses) se retrouve dans l’énergie cinétique qui anime les produits de fission et les neutrons.

$$Q = \left(M_n + M_U\right) - \left(M_{Kr} + M_{Ba} + 3M_n\right)$$
$$= 193.2 \text{ MeV} = 8.6 \times 10^{-18} \text{ kWh}$$



F. Joliot Preuve expérimentale de la rupture explosive des noyaux d'uranium et de thorium sous l'action des neutrons, C.R, de l'Académie des Sciences, 1939, 408, p. 341

F. Joliot en 1939 fût le premier à observer dans une chambre à brouillard des fragments de fission. Au milieu de la chambre se trouve une feuille très mince d'Uranium qui est exposée par un flux intense de neutrons. On peut observer un grand nombre de proton et noyaux de recul et de réactions nucléaire provoquées par les neutrons dans le gaz de la chambre. On distingue sortant de la feuille suivant des directions opposées, les trajectoires des produits de fission bien plus denses que les autres traces dans la chambre.



Peu après la découverte de la fission, la communauté scientifique prit conscience de la possibilité de produire une réaction en chaîne : les neutrons produits par une première fission peuvent à leur tour induire de nouvelles fissions et ainsi de suite. Une telle réaction en chaîne pouvant libérer une quantité d'énergie colossale.

En France, dès 1939, Joliot étudie la possibilité d'une réaction en chaine et prend une série de 3 brevets couvrant la réalisation d'un réacteur et d'une bombe (classé secret défense par le gouvernement Daladier) : Dispositif de production d'énergie, Procédés de stabilisation d'un dispositif de production d'énergie et Perfectionnement aux charges explosives.

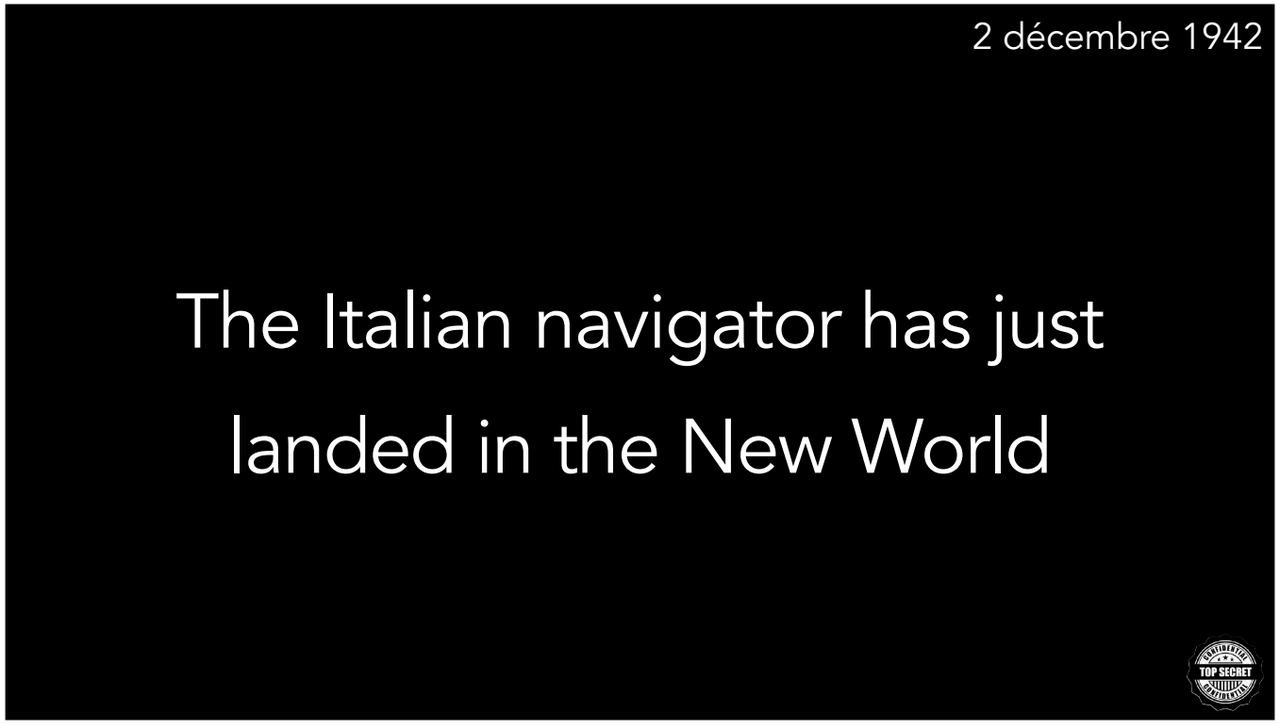
Il acquiert alors pour la France la totalité du stock mondial d'eau lourde produit en Norvège et de l'uranium qui fait de la France le premier pays au monde à s'assurer un approvisionnement en uranium, et à comprendre l'importance de l'énergie nucléaire civile et militaire.

Pendant la seconde guerre mondiale, préfère rester en France, mais ex filtre toute son équipe avec l'eau lourde en Angleterre (film de Jean Dréville La bataille de l'eau lourde). Rejoint la résistance et le parti communiste.

Le 2 décembre1942, à Chicago, la nouvelle tombe : « the Italian navigator has just landed in the New World », qui une fois décodée informe toutes les personnes habilitées que Enrico Fermi a réussi à faire diverger une pile atomique Uranium-graphite.

1 fission de U235 libère environ 200 MeV, donc pour produire 1 W (= 1 Joules/sec = 6,24x10^{12} MeV/s), il faut environ 3x10^{10} fissions par seconde
1 g d'U^{235} contient 6,02x10^{23}/235 atomes = 2.6x10^{21} noyaux d'U^{235}, dont la fission produit une puissance de10^{5} MW ou encore (1 heure = 3600 s) une énergie de 30 MWh !, soit la consommation en électricité de 40 logements.

Ce chiffre n’est bien sûre pas à prendre tel quel. Il faut encore prendre en compte plusieurs facteurs . Par exemple, la section efficace de fissions, le noyau d’uranium ne fissionne pas à coup sûr lorsqu’il rencontre un neutron (ça dépend de l’énergie du neutron), il faut ensuite récupérer l’énergie en excès (qui se présente sous forme d’énergie cinétique des produits de fission et des neutrons) et la transformer en une forme d’énergie utilisable (chauffer de l’eau par exemple), il faut ensuite transformer cette énergie (sous forme de vapeur) pour la transformer en énergie électrique, et plein d’autres facteurs qui diminuent le rendement (énergie utile récupérée divisée par énergie disponible dans la fission). Chaque transformation d’énergie a un coût, c’est-à-dire induit une perte d’énergie utilisable. Par exemple, il faut fournir 3 unités d’énergie thermique pour produire 1 unité d’énergie électrique. C’est le travail des ingénieurs qui savent très bien comment construire et optimiser le processus industriel qui consiste à transformer une forme d’énergie en une autre forme plus utilisable.



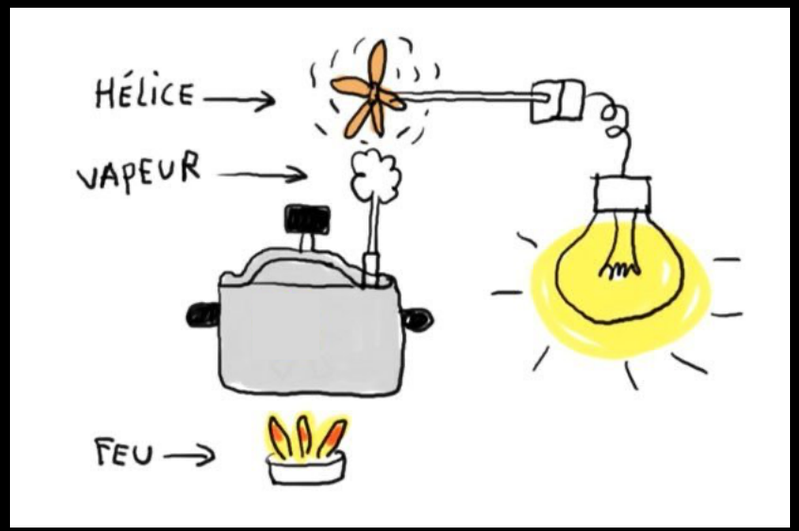
Le 2 décembre1942, à Chicago, la nouvelle tombe : « the Italian navigator has just landed in the New World », qui une fois décodée informe toutes les personnes habilitées que Enrico Fermi a réussi à faire diverger une pile atomique Uranium-graphite.

1 fission de U235 libère environ 200 MeV, donc pour produire 1 W (= 1 Joules/sec = $6{,}24 \times 10^{12}$ MeV/s), il faut environ 3×10^{10} fissions par seconde
1 g d'U^{235} contient $6{,}02 \times 10^{23}/235$ atomes = 2.6×10^{21} noyaux d'U^{235}, dont la fission produit une puissance de10^5 MW ou encore (1 heure = 3600 s) une énergie de 30 MWh !, soit la consommation en électricité de 40 logements.

Ce chiffre n'est bien sûre pas à prendre tel quel. Il faut encore prendre en compte plusieurs facteurs . Par exemple, la section efficace de fissions, le noyau d'uranium ne fissionne pas à coup sûr lorsqu'il rencontre un neutron (ça dépend de l'énergie du neutron), il faut ensuite récupérer l'énergie en excès (qui se présente sous forme d'énergie cinétique des produits de fission et des neutrons) et la transformer en une forme d'énergie utilisable (chauffer de l'eau par exemple), il faut ensuite transformer cette énergie (sous forme de vapeur) pour la transformer en énergie électrique, et plein d'autres facteurs qui diminuent le rendement (énergie utile récupérée divisée par énergie disponible dans la fission). Chaque transformation d'énergie a un coût, c'est-à-dire induit une perte d'énergie utilisable. Par exemple, il faut fournir 3 unités d'énergie thermique pour produire 1 unité d'énergie électrique. C'est le travail des ingénieurs qui savent très bien comment construire et optimiser le processus industriel qui consiste à transformer une forme d'énergie en une autre forme plus utilisable.

Comment extraire l’énergie de la matière ?

L’idée n’est pas d’exposer de façon détaillée le fonctionnement d’un réacteur nucléaire (voir le cours de l’année dernière Briques et Fabriques Nucléaires), mais plutôt d’enrichir (si nécessaire) un vocabulaire qui sera toujours utile lors de lectures, débats, contestations qui vont certainement continuer à animer notre vie quotidienne.



Le principe de base de la production d'énergie électrique vous est sans doute familier. Il faut une source de chaleur quelconque obtenue par combustion de charbon, fuel, gaz ou en fissionnant la matière. La Nature nous impose une hiérarchie des interactions (forte, électromagnétique, faible et gravitationnelle) qui rend certaines sources d'énergie plus efficaces que d'autres. Nous avons déjà vu précédemment l'efficacité (quantité de chaleur créée par volume de combustible) de la fission comparée à d'autres sources, combustion de matériaux fossiles, solaire (interaction électromagnétique), hydraulique (interaction gravitationnelle).
Une fois que la chaleur est produite, le reste ne consiste qu'à transformer l'énergie en des formes utilisables. Dans le cas de la fission : l'énergie cinétique des produits de fission est transformée en énergie calorique en chauffant de l'eau pour produire de la vapeur transformée en énergie mécanique (mise en rotation de turbines) puis finalement transformée en énergie électrique dans un générateur de courant électrique.

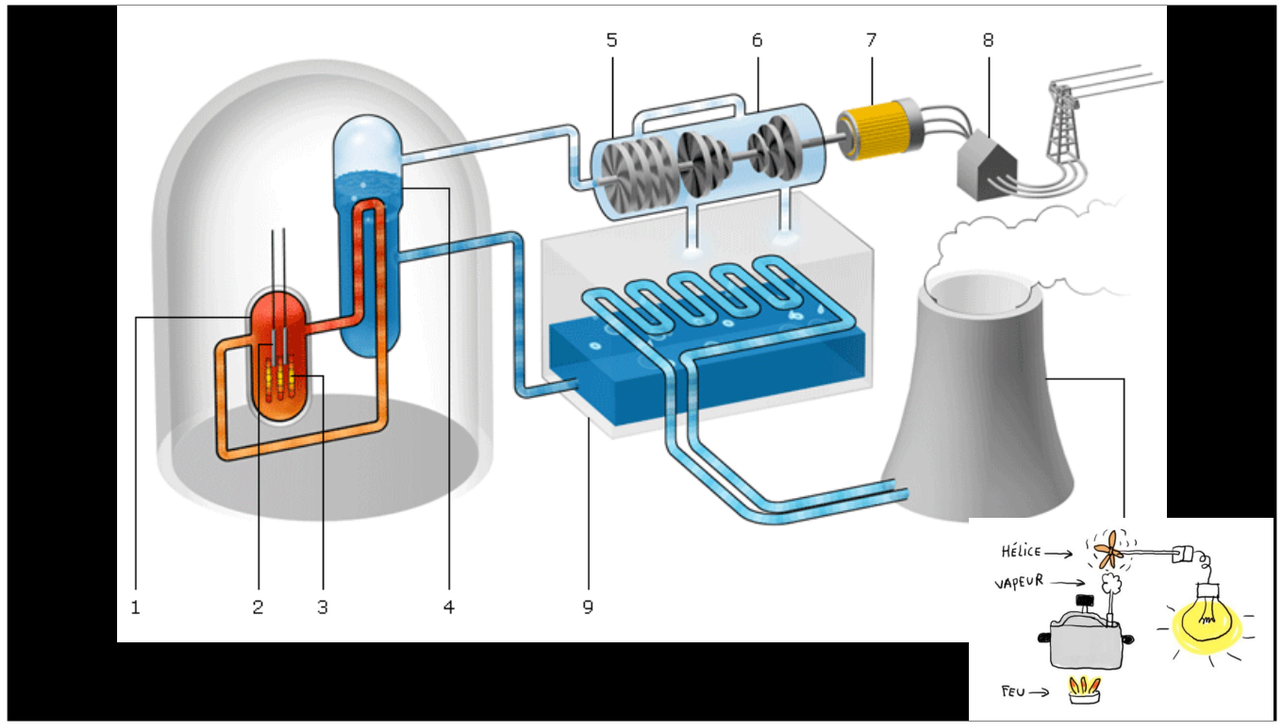
Nous allons maintenant examiner comment ce processus de transformations successives d'énergie est mis en oeuvre dans un réacteur nucléaire.

Le réacteur EPR est un REP de génération III !

L’objectif est de définir le vocabulaire utilisé pour que que des phrases telles que « … » deviennent compréhensibles. Le premier acronyme dans cette phrase, EPR, est rencontré fréquemment dans la presse quotidienne, la plupart du temps associé à la commune de Flamanville dans la Manche et presque toujours pour souligner les retards à la mise en exploitation ou les dépassements de coût. EPR est l’acronyme pour European Pressurized water Reactor.
Commençons par le début…

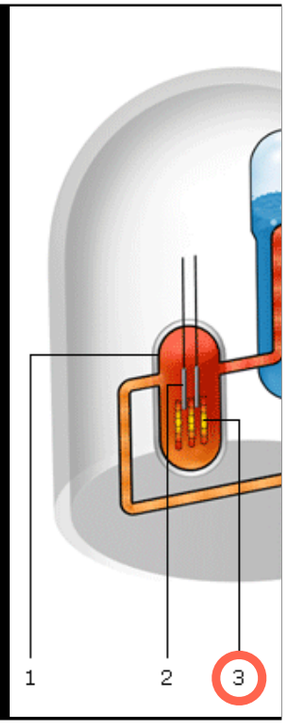
Réacteur nucléaire

Le réacteur nucléaire est le système qui a pour rôle de produire la réaction de fission en chaîne et d’en contrôler l’intensité


5
6
7
8
1
2
3
4
9
HÉLICE
VAPEUR
FEU

Réacteur nucléaire

- Matériau combustible
- Fluide caloporteur
- Système modérateur
- Système de contrôle

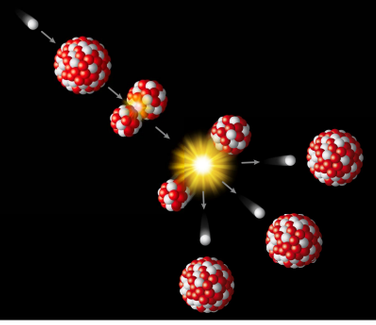


Ses principaux composants sont :

1. Le combustible, c'est-à-dire le matériau fissile que généralement on trouve dans la nature
2. Le fluide caloporteur, qui peut être liquide ou gazeux, et dont le rôle est de transporter la chaleur hors du réacteur pour actionner une turbine permettant la production d'électricité
3. Le modérateur est un matériau (solide, liquide ou gazeux) dont le rôle est de ralentir les neutrons pour favoriser les réactions de fission. Les neutrons produits par fission ont une vitesse de l'ordre de 20.000 km/s qu'il faut ralentir à une vitesse de l'ordre de 2 km/s. Le modérateur est inutile dans la filière des neutrons rapides (voir plus loin)
4. Le système de contrôle de la réaction en chaîne qui introduit dans le coeur un matériau neutrophage absorbant les neutrons (Ag, In, Cd, B, Co,…)

Ces éléments sont toujours présents quelque soit la filière avec néanmoins quelques variations.

Comment les produits de fission chauffent-ils de l'eau ?



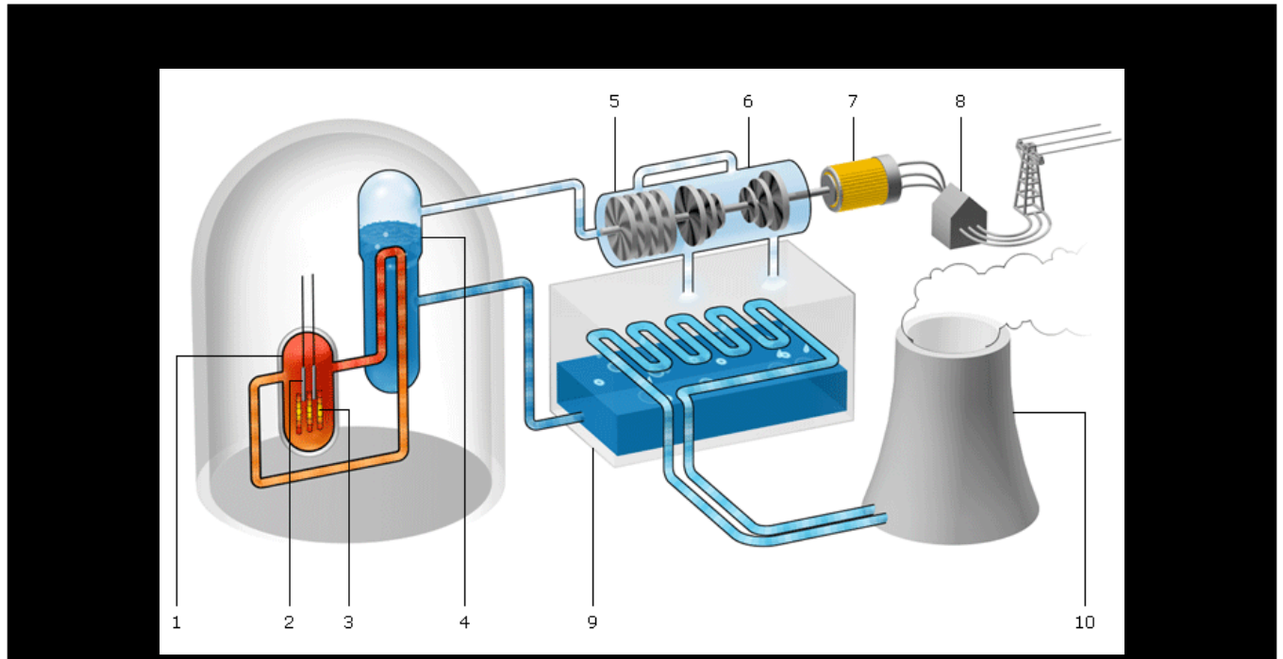
L'essentiel (de l'ordre de 80%) de l'énergie libérée durant la fission l'est sous forme d'énergie cinétique des fragments de fission. Leurs vitesse, lors de leur production, est de l'ordre de 10.000 km par seconde. Ces fragments interagissent fortement avec les atomes et les molécules du matériau qu'ils traversent et ionisent les atomes, c'est-à-dire arrachent des électrons des atomes. Ceci a un coût énergétique qui se traduit par une perte d'énergie cinétique des fragments de fission qui donc ralentissent. Les ions positifs et les électrons libres créés lors du processus d'ionisation vont subséquemment se lier à nouveau relâchant dans ce processus de l'énergie sous forme de chaleur, c'est-à-dire de l'énergie vibrationnelle ou rotationnelle conférée aux molécules.

La distance que parcourent les fragments de fission dans le matériau est très court, de l'ordre de quelques micromètres. La chaleur est ainsi créée à l'endroit où se produit la fission. Le matériau du coeur est ainsi porté à haute température transférée au liquide caloporteur dans lequel baigne le coeur.

Les filières

- Eau et Uranium enrichi
  - **R**éacteur à **E**au **P**ressurisée

Les filières sont caractérisés par le caloporteur et le combustible utilisé, les deux étant très liés. On peut distinguer 4 + 1 filières. La première utilise comme combustible de l'Uranium enrichi et comme fluide caloporteur de l'eau ordinaire. L'Uranium naturelle qu'on trouve sur Terre est essentiellement constitué d'^{238}U non fissile et de moins de 1% (0,71%) d'^{235}U qui lui est fissile. Il faut donc enrichir l'Uranium naturel en ^{235}U, généralement des teneurs de l'ordre de 5% (l'Uranium de qualité militaire est enrichi à 85% et plus). L'eau peut être sous haute pression à 155 atmosphères (la pression normale est 1 atmosphère), les réacteurs sont alors du type REP (en anglais PWR), Réacteur à Eau Pressurisée.



Le schéma type d’un REP est le suivant :
Le coeur (3) constitué de matériau fissile baigne dans l’eau sous pression T=325°C (1) qui circule sous forme liquide dans le système primaire. Dans un deuxième circuit, dit circuit secondaire le liquide caloporteur échange ses thermies avec un deuxième liquide caloporteur (4), donc jamais en contact avec le coeur, sous pression moindre (70 atmosphères) pour permettre l’ébullition et la formation de vapeur, la vapeur actionne une turbine (5,6) qui elle-même actionne un générateur (7) qui produit le courant électrique transporté chez vous. La vapeur est ensuite transformée en eau refroidie par l’eau de mer ou de rivière dans un échangeur (9)
Le liquide caloporteur peut également jouer le rôle de modérateur pour ralentir les neutrons produits dans la fission et ainsi augmenter leur capacité à générer de nouvelles fissions. Ce type de réacteur est dit réacteur à neutrons lents.
Il existe de bonnes raisons de ne pas ralentir les neutrons, on parle alors de réacteurs à neutrons rapides dont le choix du liquide caloporteur est critique.

Les filières

- Eau et Uranium enrichi
  - **R**éacteur à **E**au **P**ressurisée
  - Réacteur à Eau Bouillante

Dans la même filière, on a les réacteurs à eau bouillante. Par rapport au schéma précédent, le circuit secondaire est supprimée et l'eau en contact avec le coeur entre en ébullition et forme la vapeur.
Ces deux types de réacteur constituent l'essentiel des réacteurs actuellement opérationnels au monde.

Les filières

- Eau et Uranium enrichi
- Eau lourde et Uranium naturel
- Graphite-gaz

Citons pour être complet, les réacteur utilisant l'eau lourde (D_2O) comme liquide caloporteur et l'Uranium naturel comme combustible. D_2O étant moins absorbant que H_20, la formation de ^{239}Pu fissile est plus favorable que dans la filière précédente.

Les filières

- Eau et Uranium enrichi
- Eau lourde et Uranium naturel
- Graphite-gaz
- Neutrons rapides

La filière dite des neutrons rapides se distingue des autres filières par le fait qu’elle exploite directement les neutrons tels qu’ils sont produits par la fission donc sans les ralentir ce qui rend le modérateur superflu.

Les filières

- Eau et Uranium enrichi
- Eau lourde et Uranium naturel
- Graphite-gaz
- Neutrons rapides

$$\mathrm{U}^{238} + n \rightarrow \mathrm{U}^{239} \xrightarrow[23\ \mathrm{min}]{\beta^-} \mathrm{Np}^{239} \xrightarrow[2{,}3\ \mathrm{jours}]{\beta^-} \mathrm{Pu}^{239}$$

L’avantage des neutrons rapides est de favoriser la capture d’un neutron par l’^{238}U pour former de l’^{239}U qui par décroissance beta va en bout de chaine former de l’^{239}Pu qui lui est fissile (demi vie = 24.110 ans). Ces réacteurs génèrent ainsi plus de matière fissile qu’ils n’en consomment. En plus les neutrons rapides permettent de détruire les déchets les plus nocifs produits par les réacteurs à neutrons lents : par fission les actinides mineurs (Pu, Np, Am, Cu) qui sont des émetteurs alpha radiologiques, nocifs par ingestion, et dont la durée de vie est très longue; par capture de neutrons les produits de fission de très longue durée de vie tels ^{99}Tc et ^{129}I.
Les réacteurs à neutrons rapides permettent ainsi de multiplier par 70 la capacité énergétique des minerais de la planète. A titre d’exemple, avec la consommation actuelle et l’existence connue de la quantité d’Uranium sur Terre, la production d’électricité par les réacteurs à neutrons lents est garantie pour les 200 années à venir. Avec les réacteurs à neutrons rapides cette même production peut s’étendre sur plus de 10.000 ans !
De plus ils réduisent la radio toxicité des déchets éliminant les déchets à vie longue (centaine de milliers d’années) pour des déchets à durée de vie modérée (centaine d’années).

Le réacteur EPR est un REP de génération III !

Vous avez maintenant presque tout le vocabulaire pour comprendre cette phrase … reste « génération III » : une génération apporte un progrès dans l'utilisation des combustibles, la sureté nucléaire, la réduction des nuisances et des déchets. Actuellement, la génération la plus récente est la génération III.

$$k_{\text{eff}} = \frac{\text{Nbr neutrons produits par fission}}{\text{Nbr de neutrons perdus}}$$

Reste le paramètre clé de tous types de réacteur, sa criticité représenté par le paramètre k_{eff}. Pour maintenir la réaction en chaîne, il faut que le nombre de neutrons produits par la fission soit égal au nombre de neutrons qui disparaissent (par capture, ou qui sortent du coeur). k_{eff}, aussi appelé coefficient de multiplication ou criticité est par définition le rapport entre nombre de neutrons produits et nombre de neutrons perdus par absorption et fuite. Ce coefficient mesure la disponibilité des neutrons produits dans une fission pour produire une nouvelle fission.

$$k_{\text{eff}} = \frac{\text{Nbr neutrons produits par fission}}{\text{Nbr de neutrons absorbés + perdus}}$$

- $k_{\text{eff}} > 1$: coeur sur-critique

- $k_{\text{eff}} < 1$: coeur sous critique

Pour $k_{eff}=1$, la réaction en chaine est maintenue, $k_{eff}>1$ le coeur est sur critique, il y a plus de neutrons produits que consommés et la réaction en chaine s'emballe et pour $k_{eff}<1$ le coeur est sous-critique, les neutrons disparaissent plus vite qu'ils ne sont produits et la réaction en chaîne est stoppée. Le système de contrôle sert à maintenir la criticité à 1 et quand le système de contrôle ne joue pas ou ne peut plus jouer son rôle, on a Tchernobyl !

Les filières

- Eau et Uranium enrichi
- Eau lourde et Uranium naturel
- Graphite-gaz
- Neutrons rapides
- Système piloté par accélérateur

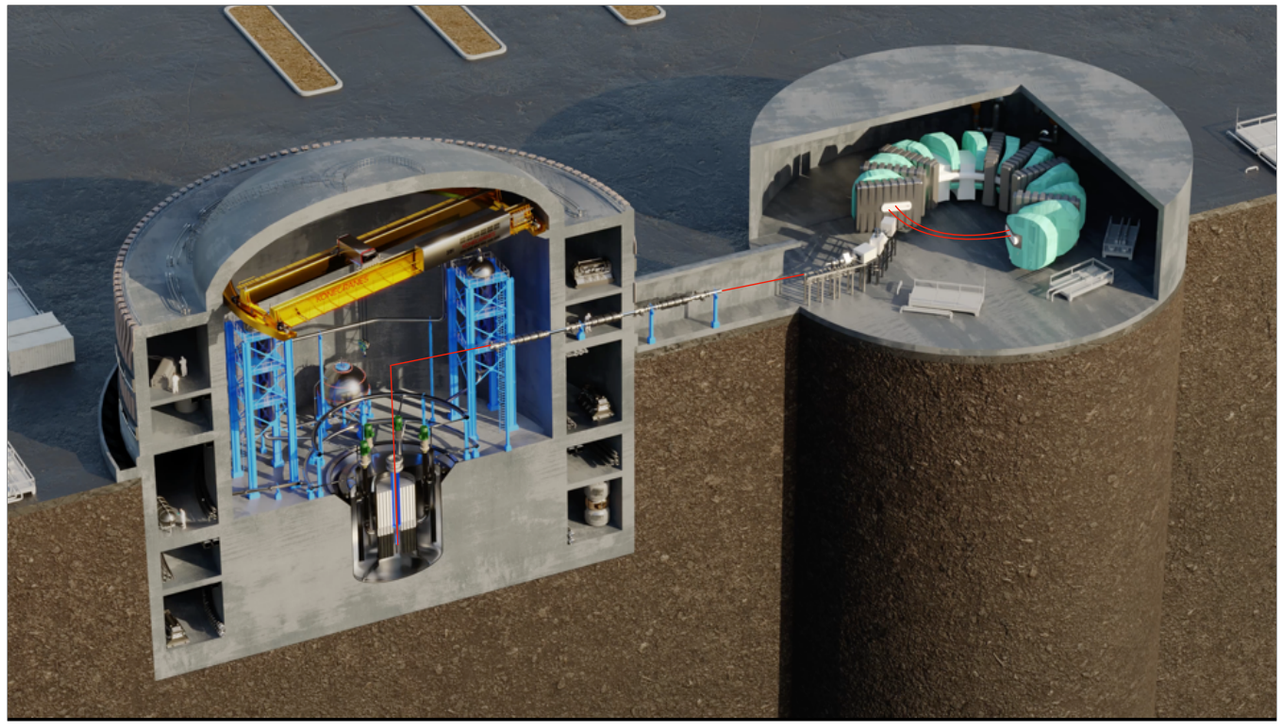
Tout un nouvelle filière : les systèmes pilotés par accélérateur.

- Système piloté par accélérateur

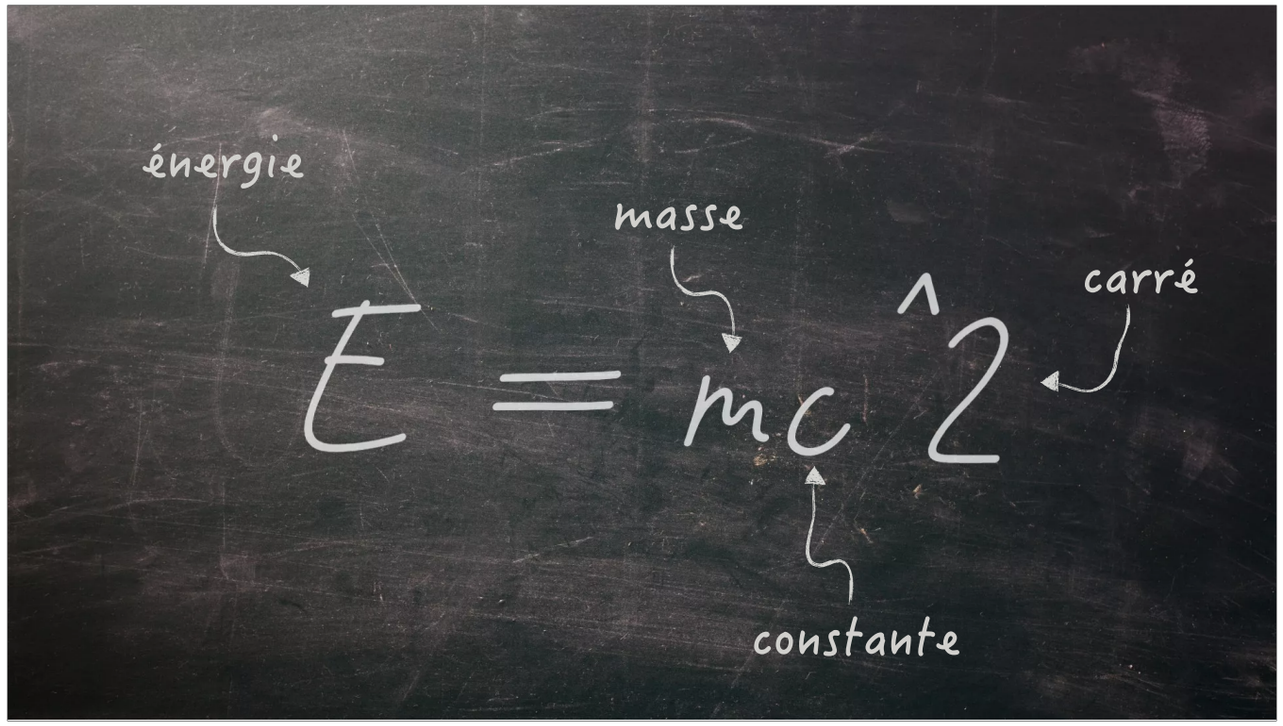
- $k_{\text{eff}} < 1$

- Source de neutrons extérieure

L’idée de base est de toujours garder le réacteur en état sous critique et d’apporter les neutrons rapides par une source extérieure. Le système de contrôle est superflu, l’accélérateur jouant lui même le rôle du système de contrôle. Il suffit d’arrêter l’accélérateur pour instantanément (de l’ordre de la milliseconde) stopper la réaction en chaine. En plus de ce contrôle ultra rapide de toute possibilité de divergence, ce type de système génère son propre combustible, accepte toutes sortes d’autres combustibles dont les déchets actinides mineurs à vie très longue et très radio toxiques produits dans les réacteurs classiques, peut incinérer les produits de fission créés dans les réacteurs classiques



Voilà à quoi pourrait ressembler un système assisté par accélérateur …. Avons nous pour autant de quoi être confiant quant à l’avenir énergétique de l’humanité ? Je vous laisse en juger par vous même, en tout cas vous avez des éléments pour en débattre de la façon la plus rationnelle possible.



Ici prend fin ce cours consacré à la plus célèbre des équations. J'espère vous avoir démontré qu'une équation peut se montrer très loquace à condition que l'on prenne le temps de bien l'écouter et qu'elle peut nous apprendre bien des choses, bien au-delà des lieux communs que peuvent nous asséner des plus ou moins spécialistes, plus ou moins mal intentionnés.
L'équation ne nous dit pas comment convertir la matière en énergie ou l'énergie en matière; elle ne nous révèle aucun secret sur la physique nucléaire et elle ne nous dit pas comment réaliser une bombe atomique.
Cette équation répond à la question posée par Einstein dans le titre de son article : « Est-ce-que l'inertie d'un corps dépend de son contenu en énergie? » et à laquelle Einstein a répondu par oui, l'inertie d'un corps, c'est-à-dire sa resistance à l'accélération ou encore sa masse est proportionnelle au contenu en énergie de corps.
Elle ne nous dit pas que l'on peut extraire cette énergie et elle ne nous dit pas non plus que cette énergie doit être sous une forme particulière, par exemple sous forme d'énergie nucléaire.

Au contraire elle nous dit que si l'on prend un objet quelconque, qu'on le chauffe, et donc qu'on augmente son énergie interne, alors cet objet deviendra plus lourd. Ou encore, quand vous brulez un combustible associé à un comburant, extrayant ainsi de l'énergie utilisée par ailleurs pour produire un travail (pour produire de l'électricité par exemple), les résidus de la combustion pèseront moins lourd que ne pesaient le combustible et le comburant.

De fait, dans ces expériences de tous les jours, les différences sont infimes et non mesurables. Et il faut des processus nucléaires pour que les changements dans l'énergie interne accompagnés de changements dans la masse inertielle deviennent mesurables.
Mais ces changements sont universels et c'est pourquoi cette équation est aujourd'hui appelée la relation d'équivalence masse-énergie. Le facteur c2 n'est qu'un facteur de conversion entre l'unité de masse et l'unité d'énergie et dont la valeur est ce qu'elle est uniquement pour des pour des raisons culturelles, propres à nous homo sapiens.

Origine de la gravitation ?

La masse , l’énergie, les deux ?