

## Sur Albert Einstein, $E = mc^2$ , et la bombe atomique.

Même sur les sites web d'institutions scientifiques, il n'est pas rare de trouver une forme ou une autre de la légende triangulaire liant Einstein et la bombe via la relation  $E = mc^2$  qui serait le grimoire de l'énergie nucléaire. Ainsi, l'auteur d'un article récemment paru dans le magazine en ligne de FermiLab <sup>1</sup>, le plus grand laboratoire américain de physique des particules, applique la fameuse formule à la propulsion des voitures en invoquant les réactions de fusion nucléaire génératrices de l'énergie solaire absorbée voici des millions d'années par les plantes qui furent ultérieurement transformées en hydrocarbures; mais en même temps, il néglige de mentionner que la combustion de ces hydrocarbures aujourd'hui et sur terre, dans le moteur d'une voiture, met en jeu exactement la même formule sans que l'énergie 'nucléaire' y ait plus rien à voir.

Notre but ici est donc de souligner que le lien très ténu entre Einstein et la bombe, que nous évoquerons brièvement par ailleurs, n'a rien à voir avec la découverte d'une loi d'équivalence absolument universelle qui est à la base de la cohésion de la matière.

En ce qui concerne le premier point, il est évidemment absurde d'attribuer la 'paternité' d'un tel engin à quelqu'un qui n'y a jamais travaillé. Assez curieusement d'ailleurs et contrairement à ce que la confusion dénoncée ici donne à penser à des millions de personnes, Einstein est un des rares grands théoriciens du vingtième siècle qui n'ait à son actif aucune contribution à la physique nucléaire et moins encore, bien entendu, à l'usage qu'on peut en faire. Ceci n'a probablement rien à voir avec un interdit qui aurait été décrété à son encontre par le chef du FBI, J-E Hoover, même si celui-ci a effectivement accumulé un abondant dossier sur les activités du grand pacifiste. Il est plus probable que ce désintérêt résulte des choix et des goûts personnels d'Einstein. Rien ni personne n'aurait pu l'empêcher de s'intéresser à la théorie du noyau, en dehors de toute application, si tel avait été son désir. Mais après avoir mis en forme la relativité générale et avoir commencé à l'appliquer au problème cosmologique, Einstein a essentiellement consacré ses recherches à des questions fondamentales, cherchant à établir une théorie des champs unifiée qui expliquerait géométriquement l'électromagnétisme comme la gravitation. Il plaçait donc la barre très haut et la physique nucléaire, qui utilise un mélange de mécanique quantique et de modèles ad hoc inspirés de domaines aussi différents que la mécanique des fluides et la physique atomique, ne répondait pas aux idéaux d'élégance, de simplicité et de généralité qui le stimulaient et lui servaient de guide. Elle était, même si l'expression peut surprendre des non-physiciens, beaucoup trop compliquée pour lui.

---

<sup>1</sup><http://www.symmetrymagazine.org/cms/?pid=1000068>

Un mot maintenant sur la genèse de la fameuse formule: elle figurait en filigrane dans le papier fondateur de la théorie de la relativité <sup>2</sup> mais Einstein l'a dérivée et explicitée dans un second article de moins de trois pages, écrit un peu plus tard <sup>3</sup>; l'idée essentielle consistait à évaluer l'énergie cinétique d'un corps avant et après qu'il ait émis deux ondes électromagnétiques de même énergie dans des directions opposées. En faisant ce choix, il pouvait affirmer que le corps en question restait au repos dans le référentiel où il était initialement au repos et donc que sa vitesse dans un référentiel inertiel quelconque ne changeait pas. Mais en même temps, il trouvait que l'énergie cinétique du corps variait d'une quantité égale à l'énergie cinétique d'un corps de même vitesse et de masse égale à l'énergie lumineuse émise divisée par  $c^2$ . D'où, sa conclusion: "Si un corps perd l'énergie  $L$  sous forme de radiation, sa masse diminue de  $L/c^2$ ". Et il observait immédiatement que le fait que l'énergie perdue le fut sous forme radiative n'intervenait nulle part et que le résultat avait donc une portée tout à fait générale.

Dans les systèmes d'unités ordinaires, adaptés à la vie de tous les jours,  $c^2$  est un très grand nombre (près de  $10^{17}$  unités S.I.) si bien que la masse correspondant à une énergie telle que, par exemple, celle du mouvement d'une voiture, est absolument microscopique et qu'inversement l'énergie correspondant à une masse d'un gramme est titanique. C'est pourquoi, dans l'article cité, Einstein suggère la possibilité de tester la relation avec des corps "dont le contenu en énergie peut varier dans de grandes proportions (par exemple, des sels de radium)" puisqu'on savait alors, grâce aux travaux des Curie, que le radium émettait des rayonnements très énergiques. Mais cela n'empêche pas la relation de s'appliquer à n'importe quelle production ou absorption d'énergie, y compris quand il s'agit simplement d'agitation thermique. Un litre d'eau chaude est plus lourd qu'un litre d'eau froide, même s'il est impossible de mesurer effectivement la différence de masse. Elle s'applique semblablement aux phénomènes électrochimiques mis en oeuvre dans une pile de lampe de poche (une pile neuve est plus lourde qu'une pile usagée bien qu'ici encore une mesure soit exclue) ou aux phénomènes liés à la transformation d'énergie mécanique potentielle en énergie cinétique ou en rayonnement.

Enfin, il est essentiel de souligner que l'équivalence masse-énergie est à la base de la cohérence de la matière; sans le petit "déficit de masse" correspondant aux énergies de liaison des nucléons il n'y aurait tout simplement pas de noyaux stables. En particulier, les commentateurs éclairés qui ont parlé de "formule funeste" ici ou là ne se rendent pas compte qu'ils lui doivent d'exister..

---

<sup>2</sup>A. Einstein, *Annalen der Physik*, **17**:891, 1905  
et cf. <http://dbserv.ihep.su/elan/src/einstein05b/eng.pdf>  
pour une traduction en ligne et en anglais

<sup>3</sup>A. Einstein, *Annalen der Physik*, **18**:639, 1905  
et <http://dbserv.ihep.su/elan/src/einstein05c/eng.pdf> pour la traduction anglaise

Le fait est que la loi de conservation de la masse "établie" par Lavoisier est, à strictement parler, fautive. S'il était possible de refaire son expérience avec une balance idéalement précise, on constaterait une différence entre les masses des réactifs initialement introduits et celles des résidus de combustion, égale au quotient par  $c^2$  de l'énergie dégagée. Mais ici encore, cette différence est beaucoup trop faible pour être mesurée. Notons que même dans une bombe atomique, la masse effectivement convertie en énergie est une très petite fraction du total. La bombe d'Hiroshima avait une énergie équivalente à celle de douze mille tonnes de TNT, pour une masse d'uranium de l'ordre de la dizaine de kilogrammes. Une kilotonne (de TNT) fournissant une énergie d'à peu près  $4,1810^{12}$  Joules, on voit que la masse effectivement convertie en énergie dans cette explosion est de l'ordre de 0,55 g soit à peu près 0,5 dix-millièmes du total. De manière très générale d'ailleurs, la formule d'Einstein s'applique sous forme différentielle; la transformation totale d'énergie en masse -ou inversement- ne s'observe que dans certaines réactions peu nombreuses en physique des particules.

En fait, pour des raisons qui tiennent à la structure de la matière ordinaire et à la mécanique quantique qui la gouverne, la partie "masse" de l'énergie contenue dans un morceau de matière est, pour l'essentiel, emmurée dans le noyau atomique qui constitue une espèce de forteresse inattaquable dans la plupart des transformations auxquelles cette matière est soumise sur terre. Cet état des choses assez particulier explique la validité presque absolue de la loi de Lavoisier<sup>4</sup>.

Mais il est possible aujourd'hui de citer quelques exemples se situant complètement à l'opposé; ainsi en va-t-il de la désintégration de la particule nommée  $\pi^0$  qui, dans un temps très court après sa formation, se transforme en une paire de photons sans masse ayant chacun une énergie égale à la moitié de la masse du  $\pi^0$  multipliée par  $c^2$ ; ou encore, de la réaction qui fonde le principe du PETscan, appareil utilisé dans le repérage précis et l'imagerie des tumeurs cancéreuses; ce qui est en jeu ici est l'annihilation du positronium (système formé d'un électron et de son antiparticule, le positron) en une paire de photons. Le positronium est formé au repos par l'association d'un électron atomique et d'un positron issu d'une désintégration  $\beta^+$  qui s'annihilent ensuite; chacun des deux photons résultant a donc une énergie bien définie, égale à la masse d'un électron multipliée par  $c^2$ . A l'inverse, un photon, "grain" d'énergie pure, peut se convertir en une paire électron-positron dans le champ électrostatique d'un noyau.

Pour en venir au troisième côté du triangle, la seule contribution d'Einstein dans la genèse de la bombe atomique américaine fut une lettre au président Roosevelt datée du 2 août 1939 et destinée à lui signaler que les dernières découvertes en physique nucléaire permettaient d'entrevoir la production d'armes de très grand pouvoir destructeur. La conséquence en fut la mise sur pied, trois mois plus

---

<sup>4</sup>voir à ce sujet le très bel article de Frank Wilczek dans *Physics Today*, décembre 2004, p.10

tard, d'un 'Comité uranium' qui attribua généreusement 6000 \$ à des recherches d'ailleurs déjà en cours. Les débuts du projet Manhattan devraient encore attendre plus d'un an.

Les raisons qui poussèrent un être fondamentalement pacifique à écrire cette lettre <sup>5</sup> ne sont pas difficiles à comprendre.

Les deux étapes décisives sur le chemin qui devait mener à la bombe étaient la découverte de la fission du noyau atomique et la démonstration de la possibilité de réactions en chaîne ; la première fut le fait des physiciens allemands O. Hahn et F. Strassman fin 1938 et immédiatement interprétée correctement par leur collaboratrice L. Meitner réfugiée en Suède (elle était juive). La possibilité de déclencher une réaction en chaîne fut établie un peu plus tard par les travaux de F. Joliot en France et de L. Szilard et E. Fermi aux Etats-Unis.

Tout cela arrivait au pire moment pour des gens qui, ayant compris ce qu'on devait attendre du régime nazi, voyaient se concrétiser brusquement la possibilité qu'il entre en possession d'une arme terrible. La lettre d'Einstein à Roosevelt, co-inspirée par Szilard, Wigner et Teller était donc parfaitement justifiée. Il aurait été totalement irresponsable de leur part de cacher aux autorités américaines le risque de voir l'Allemagne nazie être seule à posséder de tels engins; les travaux déjà cités venaient de transformer en certitude à terme ce qui n'était jusque-là qu'une vue de l'esprit; l'Allemagne avait totalement suspendu la vente du minerai d'uranium extrait des mines de Bohême depuis qu'elle avait envahi la Tchécoslovaquie, et des physiciens berlinois s'échinaient à reproduire les résultats obtenus aux Etats-Unis. En même temps, la politique de plus en plus agressive d'Hitler allait mener à l'invasion de la Pologne un mois plus tard. Il y avait tout lieu de sonner l'alarme.

Jean-Michel Lévy

---

<sup>5</sup><http://www.dannen.com/ae-fdr.html>