

Prologue

La lumière de mille soleils

Dans un livre remarquable, *Plus clair que mille soleils*, Robert Jungk [Ju1] raconte l'épopée de la fabrication de la première bombe atomique à Los Alamos. Robert Julius Oppenheimer (1904-1967) fut choisi, en 1943, comme directeur scientifique du centre de Los Alamos pour mener le projet Manhattan de la fabrication de l'arme nucléaire. Le 16 juillet 1945 eut lieu le premier essai d'une bombe atomique dans le désert, et l'auteur raconte ce qu'Oppenheimer lui confia sur ses états d'âme au moment de l'explosion :

A ce moment, chacun oubliait ce qu'il s'était proposé de faire, comme paralysé par la violence de l'explosion. Oppenheimer, cramponné à un pilier de la station de contrôle, se rappelait soudain ce passage de la Bhagavad-gītā, poème sacré des Hindous :

« Si la lumière de mille soleils

Éclatait dans le ciel

Au même instant, ce serait

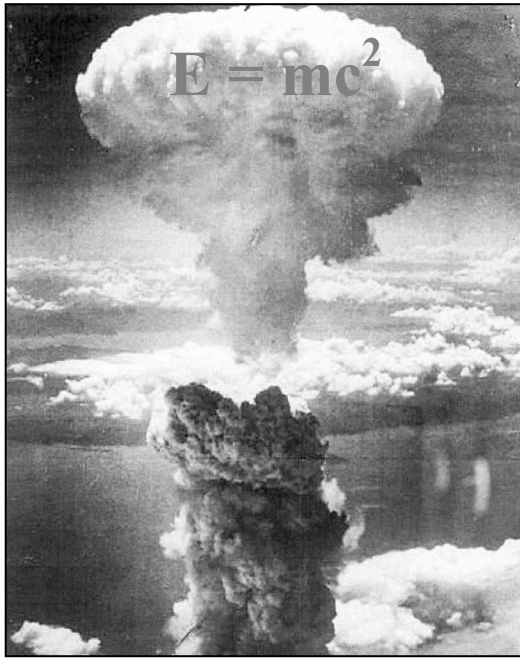
Comme cette glorieuse splendeur... »

Puis, lorsque le nuage géant, sinistre, s'éleva, là-bas, au-dessus du « point zéro », un autre passage d'un poème hindou lui revint en mémoire :

« Je suis la mort, qui ravit tout, qui ébranle les mondes »

L'auteur détaille également les réactions des autres physiciens qui participèrent à cette opération. Beaucoup racontèrent leurs impressions en termes touchant aux mystères d'une puissance divine :

Il est assez frappant que, parmi tous les assistants, aucun ne réagit aussi objectivement qu'il se l'était imaginé. Tous, même ceux qui étaient sans attaches ou même sans tendances religieuses — c'était la majorité — racontèrent l'événement en des termes empruntés aux domaines du mythe ou de la théologie. Le général Farrell, par exemple : « Le pays tout entier se trouva baigné dans une lumière dévorante, bien plus violente que celle du Soleil à midi... Au bout de trente secondes, l'explosion se produisit, la pression de l'air frappa durement les gens et les choses et, presque aussitôt, on entendit un grandement persistant et lugubre, pareil à un avertissement du Jugement dernier.



La bombe atomique américaine explose sur Nagasaki le 9 août 1945.

Plus de 200 000 japonais périrent immédiatement au cours des bombardements de Hiroshima et Nagasaki. Des centaines de milliers d'autres furent gravement irradiés.

Einstein fut accusé, à tort, d'avoir trouvé la formule qui avait permis une telle monstruosité. En fait, le concept de bombe atomique résulte, pour l'essentiel, de l'idée de Leo Szilard (1898-1964) selon laquelle les neutrons émis par une réaction nucléaire pourraient engendrer une réaction en chaîne. Il collabora avec Enrico Fermi à la fabrication de la première pile atomique.

A ce tonnerre, nous comprîmes que nous avions eu, êtres infimes, l'audace sacrilège de toucher aux forces jusqu'ici réservées au Tout-Puissant. »

Le projet Manhattan

La formule $E = mc^2$ avait démontré aux scientifiques, depuis plus de quarante ans, qu'une énergie fantastique était contenue dans l'atome. Des études en laboratoire avaient bien montré que cette énergie pouvait être libérée mais l'information en ce domaine restait limitée au cercle restreint des spécialistes. Ce fut seulement le 6 août 1945, lorsqu'une bombe atomique détruisit Hiroshima, que le monde entier prit conscience de l'énergie atomique.

Ce massacre de plus de 130 000 civils japonais par une seule bombe fut l'aboutissement du projet Manhattan. Décidé par le gouvernement américain le 6 décembre 1941, ce projet visait à réaliser une bombe atomique à l'uranium enrichi. Plusieurs laboratoires furent construits aux Etats-Unis dans ce but, le plus célèbre étant celui du Nouveau Mexique à Los Alamos. Ce dernier a été dirigé par Robert Oppenheimer qui était entouré par une brillante équipe de physiciens, parmi lesquels quatre prix Nobel de physique : Niels Bohr, James Chadwick, Enrico Fermi et Isaac Rabi. Des milliers de scientifiques, mis au secret, développèrent cette nouvelle arme. Le 16 juillet 1945 la première bombe atomique explosa sur la base aérienne d'Alamogordo.

La destruction d'Hiroshima fut suivie, trois jours après, de celle de Nagasaki par une bombe au plutonium. Environ 75 000 habitants mourront des conséquences du bombardement de cette seconde ville. Le 15 août 1945, le Japon capitula sans conditions, mettant ainsi fin à la Seconde Guerre Mondiale.

Einstein est-il coupable ?

La paternité de la bombe atomique fut très rapidement attribuée à Einstein par la presse mondiale. Pourtant Einstein affirme aux journalistes du *New York Times*, dès le 12 août 1945 :



Albert Einstein (1879-1955)

En 1905, Einstein publie une série d'articles scientifiques remarquables. Dans le premier, il postule que le rayonnement est quantifié ce qui lui permet d'expliquer l'effet photoélectrique. Ce travail lui vaudra le Prix Nobel de physique en 1921.

Un deuxième article de 1905 porte sur la théorie de la relativité restreinte. Il y développe les conséquences de la relativité sur l'énergie lumineuse mesurée dans deux référentiels en translation l'un par rapport à l'autre. De ce résultat, il en déduira, la même année, la formule donnant l'équivalence entre la masse et l'énergie.

« Je n'ai jamais travaillé sur la bombe atomique, jamais. » Qu'importe, on le considérera comme le « père » scientifique. N'avait-il pas prévu par sa fameuse formule $E = mc^2$ que la matière possédait une fantastique énergie dont la bombe venait de démontrer la réalité ? Le mythe d'Einstein va être sinistrement auréolé le 1^{er} juillet 1946 par la couverture du *Times* qui publie une photo d'Einstein se détachant sur le champignon d'une explosion atomique dans lequel figure la fameuse équation $E = mc^2$.

Einstein aura beau se défendre ; démontrer que la mise au point de la réaction de fission en chaîne dépend de techniques expérimentales qu'il ne connaissait pas ; argumenter que lorsqu'une découverte scientifique est faite, elle ne peut être longtemps cachée. Einstein ressent cependant un grand malaise. Il accepte, en 1946, de militer dans une organisation, le *Comité d'urgence des savants atomistes*, dont il accepte la présidence, pour mettre en garde le monde contre le péril nucléaire.

Pourquoi Einstein éprouve-t-il, malgré sa bonne conscience de scientifique, une responsabilité qui l'accable ? C'est que le 2 août 1939, Einstein a adressé au président des Etats-Unis, Franklin Delano Roosevelt (1882-1945), une lettre expliquant que l'Allemagne nazie effectue des recherches sur la fission nucléaire et la création possible d'une bombe atomique. Le 14 août 1940, le Comité consultatif pour l'uranium, un organisme fédéral créé par Roosevelt, après avoir pris connaissance de la lettre, demande la création d'un projet de recherche sur le thème de la fission nucléaire et de ses applications militaires.

Einstein écrira à son ami Linus Pauling, double prix Nobel de chimie et de la paix : « J'ai commis une seule erreur dans ma vie le jour où j'ai signé cette lettre au président Roosevelt. » Sa lettre est un regret qui le poursuit : « Si j'avais su que les Allemands ne réussiraient pas à produire une bombe atomique, je n'aurais pas levé le petit doigt. » Sa démarche auprès du Président n'avait cependant guère été suivie d'effet et la recherche développée à partir de 1940 était assez modeste.

Les morts et les blessés irradiés d'Hiroshima et de Nagasaki auraient-ils pu être évités ? Dans son ouvrage, *Ne dites pas à Dieu ce qu'il doit faire* [C11], consacré à une biographie d'Einstein, François de Closets se pose la question :

Certes les Américains se seraient dotés de l'arme nucléaire en tout état de cause, mais nous savons que le tragique de cette histoire tient au calendrier. Or la démarche d'Einstein a, peut-être, précipité le cours des événements. Si Roosevelt

n'avait pas été alerté dès 1939, il aurait sans doute tardé quelques mois de plus. La bombe n'aurait été opérationnelle qu'en 1946, c'est-à-dire après la fin de la guerre, et n'aurait jamais été utilisée. La suite de l'Histoire aurait été modifiée. Comment esquivé la question ? Comment donner une réponse ?

La fantastique énergie contenue dans la matière

Pourquoi une bombe atomique de taille équivalente à une bombe à explosif classique, développe-t-elle une énergie des milliers de fois supérieure ? Ainsi la bombe qui détruisit Hiroshima explose en produisant une énergie équivalente à environ 15 000 tonnes de TNT, explosif très puissant. Or une masse d'uranium de 52 kilogrammes est seulement nécessaire pour atteindre ce qu'on appelle sa *masse critique*, c'est-à-dire la masse à partir de laquelle s'effectue spontanément une réaction en chaîne engendrant son explosion. Même si dans les bombes atomiques, la quantité de matière fissile est en général de l'ordre de trois fois la masse critique, leur taille n'est finalement pas très importante, très loin derrière leur équivalent en explosif classique.

La signification de $E = mc^2$

On a les symboles suivants : E désigne une énergie ; m est une masse ; c est la vitesse de la lumière, peu différente de 300 000 kilomètres par seconde. La célèbre formule signifie qu'une quantité d'énergie E , qui par définition est immatérielle et ne possède donc pas de masse, est cependant *équivalente* à une certaine masse m donnée par la relation $m = E/c^2$. Réciproquement, si une énergie E est créée par la disparition d'une certaine quantité de masse m , celle-ci est équivalente à une énergie E telle que $E = mc^2$.

Cette équivalence complète entre la matière et l'énergie montre qu'il n'existe qu'une seule entité qui nous apparaît sous deux formes distinctes. Cette entité peut être appelée la *matière-énergie*.

Le défaut de masse des éléments chimiques

Les atomes sont constitués par la réunion de particules plus élémentaires : proton, neutron, électron. Lorsqu'un atome quelconque est formé, on s'est aperçu que la somme des masses des différentes particules élémentaires, mesurées séparément, formant cet atome est supérieure à la masse de ce dernier. On a donc ce qu'on appelle un *défaut de masse* numériquement égal à la différence entre cette somme et la masse de l'atome ainsi formé [H12].

Insistons sur le fait que ce « défaut de masse » est un phénomène essentiellement collectif, relatif aux interactions et aux phénomènes cinétiques, et ne concerne nullement la masse de chaque particule élémentaire qui reste invariante.

Examinons le cas de l'atome d'hydrogène. Celui-ci est constitué d'un proton et d'un électron. La somme des masses de l'électron et du proton, mesurées séparément, est supérieure de $2,4 \times 10^{-35}$ kilogramme à celle de la masse d'un atome d'hydrogène. Ce défaut de masse est dû à la somme de l'énergie électrostatique d'interaction entre le proton et l'électron et de l'énergie cinétique de l'électron gravitant autour du proton. Cette différence des masses est extrêmement faible. Si l'on utilise la formule $E = mc^2$, on voit que l'énergie E

relative à ce défaut de masse, malgré la valeur importante de c^2 , est extrêmement faible.

Par contre, les énergies de liaison entre les neutrons et les protons, formant le noyau d'un atome, sont d'un ordre de grandeur bien supérieur. La masse des nucléons à l'état libre est plus grande que celle du système formé par ces mêmes nucléons liés dans le noyau, et le défaut de masse est donc plus important que celui résultant de l'interaction électrostatique entre noyau et électron. La force de liaison entre les nucléons est appelée *interaction forte* ; elle n'est pas de nature électromagnétique.

La récupération des énergies de liaison

Lorsqu'une molécule d'hydrogène brûle en se combinant avec une molécule d'oxygène en formant de l'eau, la quantité de chaleur dégagée est due à l'énergie chimique mise en jeu, c'est-à-dire à la variation des énergies de liaison entre les électrons et les protons. Ces variations d'énergie ne peuvent être que très faibles, pour un atome donné, puisqu'elles concernent des énergies de liaison entre les électrons et les protons formant le noyau des atomes.

Il en est de même pour toutes les réactions chimiques qui dégagent de l'énergie. Le résultat de cette réaction conduit à la formation d'autres composés avec un réarrangement des électrons dans les molécules formées et dégagement d'une certaine énergie.

Par contre, les réactions dites nucléaires concernent les énergies de liaison entre les nucléons. Or l'énergie moyenne de liaison dans un noyau atomique, rapportée à un nucléon, est environ un million de fois supérieure à celle d'une liaison entre un électron et le noyau d'un atome.

Le processus dit de *fusion nucléaire*, c'est-à-dire de création d'un noyau atomique à partir de nucléons avec émission d'énergie, est à l'origine du rayonnement émis par les étoiles. Ainsi, le Soleil « brûle » son hydrogène en une série de réactions qui, globalement, conduisent à la fusion de quatre nucléons pour former un noyau d'hélium avec dégagement d'une énorme énergie sous forme de rayonnement électromagnétique. Maîtriser sur Terre la fusion permettrait de domestiquer cette formidable énergie cette maîtrise est encore lointaine.

Dans le processus de *fission nucléaire*, ce sont les noyaux atomiques lourds qui, en se scindant pour former d'autres noyaux plus petits, dégagent une énergie considérable. Par exemple, la fission de l'uranium 235 sous l'impact d'un neutron conduit à la formation de noyaux plus légers. L'énergie de liaison par nucléon de l'uranium étant plus faible que celle des nucléons dans les noyaux formés, la différence entre ces énergies est émise vers l'extérieur. C'est une telle énergie qui est récupérée dans les centrales nucléaires.

$E = mc^2$: les centrales nucléaires

Si la bombe atomique fut la première application spectaculaire de l'énergie nucléaire, le retour de la paix vit heureusement son utilisation pacifique dans des centrales nucléaires afin de fournir de l'énergie électrique. Parallèlement, divers Etats apportèrent une « amélioration » spectaculaire aux bombes atomiques en s'en servant comme détonateur pour déclencher une fusion nucléaire de l'hydrogène (bombe H) et multiplier par un facteur d'au moins cent la puissance d'une bombe atomique.



Tchernobyl. Centrale nucléaire

Le 26 avril 1986, une partie de la centrale nucléaire de Tchernobyl explose. Le réacteur crache dans l'atmosphère l'équivalent de deux cents bombes d'Hiroshima. Les trois quarts de l'Europe sont pollués.

La fission de l'uranium engendre des noyaux atomiques plus légers en dégageant une énergie considérable. Le problème des déchets radioactifs n'est cependant pas résolu.

La maîtrise de l'énergie nucléaire

Lors de la scission d'un noyau atomique lourd, l'uranium 235 par exemple, celui-ci, après la capture d'un neutron, éclate en donnant deux nouveaux noyaux et un nombre moyen de neutrons rapides compris entre 2,4 et 3. Ces neutrons peuvent à leur tour engendrer de nouvelles fissions de noyaux avoisinants ; on obtient une réaction en chaîne déclenchant une explosion atomique.

Pour maîtriser les réactions nucléaires, il faut ralentir la vitesse des neutrons émis lors des fissions nucléaires. Pour cela, il faut que les neutrons rencontrent d'autres noyaux d'un matériau appelé *modérateur*. Les noyaux sont d'autant plus efficaces pour modérer l'ardeur des neutrons rapides que leur masse est plus proche de celle du neutron. Un modérateur est donc un matériau comportant au moins un élément de masse atomique faible, tel qu'hydrogène, deutérium, carbone, etc. L'eau, l'eau lourde, le graphite, sont utilisés dans ce but. De plus, des barres de cadmium permettent d'absorber une partie des neutrons et donc de ralentir et même d'arrêter les réactions de fission.

Frédéric Joliot-Curie (1900-1958) et sa femme Irène (1897-1956) découvrirent l'émission des neutrons lors de la fission nucléaire permettant de mieux comprendre ce phénomène. Avec Hans Halban et Lew Kowarski, ils montrèrent la possibilité d'une réaction en chaîne entretenue ainsi que l'utilisation de l'énergie libérée. Frédéric Joliot-Curie fut le premier haut-commissaire au Commissariat à l'énergie atomique. Il dirigea la construction de la première pile atomique française, en 1945, qui allait enfanter les centrales nucléaires.

Tchernobyl, la plus grande catastrophe d'une centrale nucléaire

Si les destructions d'Hiroshima et de Nagasaki constituent l'histoire sombre de l'énergie nucléaire, son utilisation industrielle peut également assombrir la brillante formule d'équivalence entre masse et énergie. Outre les problèmes liés à ses déchets radioactifs de longue durée, l'industrie nucléaire engendre un certain nombre d'accidents dus à des irradiations et la catastrophe de Tchernobyl doit nous rappeler la vigilance envers ses risques.

Le 26 avril 1986, la centrale nucléaire de Tchernobyl, en Ukraine, explose. L'enfer nucléaire s'est de nouveau déchaîné pour tuer d'innombrables innocents. Les trois quarts de l'Europe sont pollués par des éléments radioactifs, des millions de personnes sont irradiées. C'est le plus grave accident nucléaire qui ait jamais eut lieu. Des milliers de victimes irradiés moururent rapidement. Vingt ans après,

des victimes contaminées par les radiations continuent de mourir à petit feu dans les trois états les plus touchés, Ukraine, Belarus et Russie.

L'ouvrage de Philippe Coumarionos, *Tchernobyl. Après l'apocalypse*, parus en 2000, montre l'ampleur de la catastrophe et l'improvisation de la lutte entreprise pour stopper les émissions radioactives [Co1] :

Après ce premier survol, les pires craintes furent confirmées : le cœur avait bien fondu. [...] La température y était de plusieurs milliers de degrés. Tout le monde était pris de court. Personne ne savait comment refroidir le magma nucléaire et stopper les émissions d'isotopes. On improvisa.

[...] Entre le 27 avril et le 7 mai, deux villes et soixante-dix localités, situées dans un rayon de trente kilomètres autour de la centrale, furent vidées de leurs habitants.

[...] On fit appel à l'esprit de sacrifice de tout un peuple : 650 000 hommes, dont la moitié venus d'Ukraine, convergèrent des quatre coins de l'URSS. Pendant près de deux ans, ils participèrent, en se relayant, aux opérations d'évacuation et de décontamination. On les surnomma « liquidateurs ». [...] Près de 200 000 liquidateurs encaissèrent des doses au moins cent fois supérieures à la norme et souffrent aujourd'hui de maladies chroniques.

[...] Kiev faisait état de 15 000 morts. En outre, trois millions d'Ukrainiens, dont un million d'enfants, souffriraient à divers degrés de troubles de la santé.

De l'essence des choses aux principes qui les organisent

Si l'équivalence entre la masse et l'énergie entra brutalement dans la conscience des peuples lors du massacre de centaines de milliers de Japonais en 1945 et fut réactualisée par les morts d'Ukraine en 1986, elle fit lentement son chemin dans l'esprit des scientifiques au cours des 18^e et 19^e siècles. C'est précisément ce cheminement de la pensée scientifique que nous allons étudier au cours de cet ouvrage.

La recherche d'une entité primordiale

Ce ne sont d'ailleurs pas seulement deux siècles d'idées scientifiques qu'il faudrait explorer car la science est aussi vieille que l'humanité. Une continuité des idées a toujours eu lieu à travers les siècles, chaque génération héritant des découvertes et des spéculations de ses prédécesseurs. L'idée de l'équivalence entre la masse et l'énergie, aboutissant à la notion d'une entité primordiale se manifestant sous forme d'énergie ou de matière, est une recherche d'unification qui plonge ses racines dans de très anciennes philosophies.

On peut dire que l'idée d'un dieu créateur procède d'une recherche de ce type. Imaginer une « substance » unique créatrice de toutes choses, n'est-ce pas imaginer l'existence d'un Dieu, même si l'on ajoute à ce dernier quelques propriétés supplémentaires comme celle, par exemple, d'être infiniment bon. La création du Monde est alors facilitée puisque cette « substance » déifiée préexiste à la formation de l'Univers.

Les philosophes grecs se sont préoccupés de la création de l'Univers ainsi que des êtres vivants. Anaximandre (–610, –546) « explique » l'univers en faisant de la matière infinie et éternelle le principe de tous les éléments et des êtres finis ; il y a un pressentiment du transformisme dans sa théorie de la genèse des êtres vivants.



Marin Mersenne (1588-1648)

Homme de science, l'abbé Mersenne fit des travaux importants en mécanique, acoustique et optique. Il découvrit les lois des tuyaux sonores et des cordes vibrantes. Il détermina la relation entre les fréquences et les notes de la gamme.

L'abbé Mersenne joua un rôle important dans la diffusion des idées scientifiques. Il faisait recopier les textes des savants par les moines de son couvent et les envoyait aux beaux esprits de toute l'Europe. Mersenne était l'Internet du 17^e siècle.

Les philosophes essaient également de spéculer sur l'existence d'un élément primordial de l'Univers. Thalès de Milet (–625, –546) pense trouver cet élément fondamental dans l'eau, tandis qu'Anaximène (–550, –480), disciple d'Anaximandre, fait de l'air le principe de l'Univers.

La recherche d'un principe d'unification moins nébuleux fut inauguré par Leucippe (–460, –370) qui proposa la première théorie atomiste en imaginant que toutes les substances sont composées de particules indivisibles, les atomes [H12]. Tous ces atomes, constitués d'une seule et même matière, étaient de formes variées dont résultaient en partie les différences manifestées par les corps. Les philosophes et les savants discutèrent de l'hypothèse des atomes durant plus de deux millénaires sans dissiper les doutes qui entourèrent cette théorie jusqu'au début du 20^e siècle.

La vérité scientifique se définit sur le plan du phénomène

La science restera fortement imprégnée des spéculations des philosophes grecs jusqu'au 17^e siècle au cours duquel une certaine séparation de la métaphysique et de la science commencera à se réaliser. La science est certes toujours à la recherche de principes fondamentaux, de l'essence des choses : qu'est-ce que la matière, la lumière, la vie, etc. ? Tout comme au temps de Platon et d'Aristote, la science recherche des schémas intelligibles au-delà des apparences mais les savants et philosophes du 17^e siècle vont se demander ce qu'on entend par l'intelligible.

Curieusement, ce sera au nom de la révélation divine dans l'Écriture que la science va gagner en objectivité. Par exemple, dans son ouvrage, *L'impiété des déistes*, l'abbé Marin Mersenne (1588-1648) nous dit que les raisons dernières sont le secret de Dieu et qu'il nous les révélera au ciel. En attendant, il suffit d'imaginer des hypothèses vraisemblables puisque, au niveau de notre science humaine :

Nous ne pouvons rien voir que la quantité, la figure, la lumière ou la couleur des choses, car nous n'apercevons point les accidents internes, et les externes que nous voyons ne sont pas moins cachés que les internes.

C'est donc en limitant son objet aux phénomènes que la science doit acquérir ses véritables certitudes. En renonçant à connaître l'essence des choses, la science s'allégeait d'un poids considérable. De ce fait, elle se devait de formuler à son usage un nouveau type d'intelligibilité que les Anciens n'avaient même pas soupçonné. Pour ces derniers, une vérité était intelligible lorsqu'on pouvait y voir un certain reflet de l'essence des choses.