

## LES PARTICULES ELEMENTAIRES – ORIGINE DE LA MASSE

Par Michel Grand

Novembre 2012

L'annonce faite par la direction du CERN le 4 juillet 2012, après la confirmation expérimentale de l'existence du boson « dit » de Higgs a fait l'objet d'une avalanche de commentaires plus ou moins éclairés, de la part des divers médias du monde entier.

Cela va de la menace terrifiante prédite par des « érudits », d'un trou noir qui nous engloberait tous, à la déclaration enflammée d'optimistes qui y voient la preuve définitive de l'existence de Dieu.

*Notons au passage que le terme « particule de dieu » utilisé jusque dans certaines revues « scientifiques » provient au départ...d'une erreur de traduction.*

Le comportement des chaînes de télévision n' a pas fait exception à la règle, ce médium d'influence colossale n'a rien dit de l'avancée que représente la confirmation de ce qu'on appelle « le modèle standard ».

Il est vrai qu'il est beaucoup plus rentable de dissenter à longueur de J T des frasques des « people » qui polluent à longueur d'année les ondes radio-télévisées.

Après un point sur le monde subatomique, nous tenterons d'établir une version un peu plus sérieuse du fameux boson, (même s'il ne s'agit que d'un résumé).

### Le monde atomique :

Nous commencerons par un rappel sommaire de la constitution de la matière à l'échelle atomique :

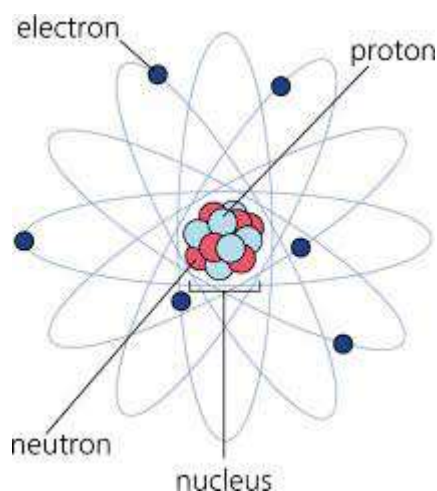
L'atome à la base, est constitué d'un noyau comprenant des protons et des neutrons, le tout entouré d'un nuage d'électrons à des distances comparativement gigantesques, soit dans les proportions de dimension indiquées plus bas dans tableaux 1 et 2.

La symbolisation couramment utilisée pour l'atome est du type:  ${}_Z X^A$  . Z pour le numéro atomique (en fait nombre de protons et d'électrons) et A pour le nombre de masse ( quantité de nucléons).

Exemples :  ${}_1 H^1$  pour l'hydrogène, ou  ${}_6 C^{12}$  pour le carbone 12, soit 12 nucléons (addition des protons et des neutrons), 6 protons, 6 neutrons et 6 électrons.

Nota : Dans les atomes stables, le nombre de protons est égal au nombre d'électrons. C'est même pour cela qu'ils sont stables, car le proton a une charge positive ( $p^+$ ) et l'électron une charge négative ( $e^-$ ) ; ces deux charges étant de valeur identique.

Quant au neutron, dont le nombre est égal à la différence entre A et Z, il n'a pas de charge et est donc électriquement neutre ( $n^0$ ).



Comparatif en échelle de dimension :

Tableau 1

Atome	Noyau	Electron
$10^{-10} \text{ m}$ (1/10.000 de micron) (1 micron = un millionième de mètre)	$10^{-15}$ (un milliardième de micron ou un fermi)	$10^{-18}$ ( un millième de milliardième de micron)

Tableau 2

Illustration par grossissement mille milliard de fois de l'atome d'hydrogène (symbole  ${}^1\text{H}^1$ ):

Simulation du grossissement de l'atome d'hydrogène par $10^{12}$	Diamètre de L'atome d'hydrogène multiplié par $10^{12}$	Diamètre du noyau ( 1 proton) multiplié par $10^{12}$	Diamètre de L'électron (1 électron) multiplié par $10^{12}$
Diamètre	100 m	1 mm	<1 micron
Rapport des diamètres	1/1	1/100.000	>1/100.000.000
Masse (en tonnes)		1.700.000	910

Nota : La notion de diamètre utilisée dans le tableau est purement conventionnelle

Comparatif en volumes :

Quand on considère l'échelle des tableaux ci-dessus, on comprend aisément que l'essentiel du volume de l'atome est vide et ce, dans une proportion faramineuse : 99, 999999999999 %

Quand on sait que les nucléons qui forment le noyau sont eux-mêmes constitués de quarks sans volume, on en conclut que l'atome est pratiquement vide.

On remarque également que 99,97 % de la masse est concentrée dans le noyau.

Conclusion troublante: tout ce qui existe en tant que matière est constitué à 99, 999999999999 % de vide.

Si la définition de la constitution de la matière au niveau atomique, telle que présentée ci-dessus, est suffisante pour appréhender les premiers éléments de chimie en classe de troisième, elle n'explique en rien les lois de la nature et ne donne pas la moindre idée des théories qui définissent de quoi est réellement faite la matière.

Il nous faut donc aller plus loin.

### Le modèle standard de la physique des particules :

Aujourd'hui, après des années de recherche de scientifiques du monde entier, existe une théorie bien démontrée, applicable à une large gamme de phénomènes physiques.

On appelle cette théorie : « le modèle standard de la physique des particules ».

Cette équation - car tout tient dans une équation d'une demi-page - définit les lois selon lesquelles chacune des particules de l'Univers interagit avec chaque autre particule.

Le seul problème non encore résolu, c'est que cette théorie ne tient pas compte de la gravitation ; ce qui n'empêche pas que sa précision relative soit estimée par la communauté scientifique à  $10^{-10}$  (confirmé à 99.999999999 %).

Le modèle standard prend comme base l'existence dans la matière de 12 particules, dont 4 (les quarks up et down, le neutrino et l'électron) représentent les briques élémentaires de tout ce qui existe.

Quelles sont ces 12 particules ?

6 type de « quarks », 3 types de « leptons » chargés et 3 types de « neutrinos ». A cela, il faut rajouter qu'à chaque particule correspond une anti-particule d'antimatière. Cette notion d'antimatière n'a rien à voir avec de la science fiction, car l'antimatière est un composant indispensable à

l'Univers .C'est ce que compris Paul Dirac lorsqu'il découvrit en 1920 , l'existence du positon (l'anti-électron)

A propos d'antimatière, en se référant au phénomène de transformation de masse en énergie pure, (voir le mémoire « énergie solaire-fusion nucléaire »), par exemple par la disparition d'un positon et d'un électron au profit de deux photons  $\gamma$  , il faut savoir que ce processus a joué un rôle déterminant dans les premiers instants de l'Univers où la matière et l'antimatière se sont pratiquement totalement annihilées du fait de ce type de réaction. Nous ne voyons aujourd'hui que le reste de cette annihilation.

Ainsi, les physiciens estiment que pour chaque particule de matière existant dans l'Univers, il existe environ 100 milliards de photons. Autrement dit, sur chaque centaine de milliards de particules créées juste après le Big Bang, seulement une a subsisté.

### Le LHC :

Chacun d'entre nous, a entendu parler du Large Hadrons Collider (LHC) installé au Centre d'Etude de Recherche Nucléaire à Genève. Il s'agit du plus puissant accélérateur de particules du monde. C'est celui qui a permis, en juin / juillet 2012, la découverte, quasi-confirmée (degré d'incertitude/10<sup>-4</sup>), du fameux boson de Higgs (ou en tous cas d'une particule qui a les mêmes caractéristiques).

Comment cet accélérateur de particules fonctionne-t-il ?

Deux faisceaux de particules subatomiques de la famille des « hadrons » (des protons) circulent en sens inverse à l'intérieur d'un accélérateur circulaire de 26,659 km de circonférence à raison de 11245 tours par seconde.

Pour éviter les pertes thermiques générées par les électro-aimants de courbure et de focalisation des faisceaux, le tunnel est maintenu à une température de  $-271.3^{\circ}\text{C}$ .

Les deux faisceaux de particules emmagasinent chacun de l'énergie jusqu'à 7Tera-eV ( 7 mille milliards d'électronvolt) soit 7500 fois leur énergie de masse. L'énergie totale de deux protons incidents sera ainsi de 14 TeV

(14 mille milliards d'électronvolts)

En faisant entrer en collision frontale les deux faisceaux à une vitesse très proche de celle de la lumière (299 792 455,3 au lieu de 299 792 458 mètres par seconde) donc à très haute énergie, la collision va générer tout un flot de particules qui se désintègreront spontanément mais laisseront les traces tangibles de leur existence.

En fait, le LHC recrée les conditions qui existaient juste après le Big Bang.

Six détecteurs, dont quatre de la taille d'une cathédrale, sont installés sur cet accélérateur. Dans le cas présent les deux en fonction sont Atlas et CMS.

Il restera aux équipes de physiciens du monde entier à analyser les particules issues de ces collisions

**Note :** En physique, l'électron-volt est une unité de mesure d'énergie. Sa valeur est définie comme étant l'énergie acquise par un électron accéléré depuis le repos par une différence de potentiel d'un volt :  $1\text{ eV} = e \cdot V$ , où  $e$  est la valeur absolue de la charge de l'électron.

### Les particules élémentaires :

Après les noms « barbares » évoqués plus haut (quark, lepton, neutrino, positon), que signifie ce nouveau **Hadron** ? Il est temps d'identifier tout ce monde.

Les particules constituées de quarks, sont nommées hadrons (du grec hadros = fort) Ce sont celles qui sont concernées par l'interaction forte. Il y a deux sorte de hadrons :

Les **baryons** ( particules lourdes) qui constituent la matière et qui comportent trois quarks formant les noyaux (les nucléons).

Les **mésons** combinaison de quarks et d'anti-quarks qui donneront une anti-particule.

D'abord les nucléons (**baryons** dans le modèle standard) que sont le neutron ou le proton, lesquels sont sécables en « **quarks** »

Le proton est constitué de 2 quarks « up » (charge  $2/3 e$ ) et 1 quark « down » (charge  $-1/3 e$ )

$p^+ = uud$

Le neutron est constitué de 1 quark « up » (charge  $2/3 e$ ) et de 2 quarks « down » charge  $-1/3 e$ )

$n^0 = udd$

La charge « e » , comme expliqué plus haut, correspond à l'unité de charge de l'électron, soit + ou - e  
Ceci explique par ailleurs les polarités respectives des protons et des neutrons, puisque :

Pour le proton  $2/3 + 2/3 - 1/3 = 1e$  ( charge e +)

Pour le neutron  $2/3 - 1/3 - 1/3 = 0 e$  ( pas de charge)

Les **quarks** sont donc des particules de matière (ou **fermions**). Il existe d'autres quarks de deuxième et troisième génération que sont les quarks charm et top ( même charge  $2/3$  de e, que le quark up mais de masses très différentes) et strange et bottom ( même charge  $-1/3$  de e que le quark down mais de masses très différentes)

Toujours dans la famille des fermions (particules de matière) , nous trouvons les « **leptons** » divisés en deux sous-groupe.

Les particules de charge  $-1$  comme l'**électron** e-, le **muon**  $\mu^-$  , la particule **tau**  $\tau^-$  - (mais de masses très différentes les uns des autres)

Les particules sans charge les **neutrinos** électroniques, muoniques et tauiques.

Le deuxième groupe comprend les particules d'interaction (qui transportent les forces).

Ce groupe est appelé le groupe des « **bosons** », comme le fameux boson de Higgs dont nous parlerons plus en détail.

Dans ces bosons « vecteurs », le plus célèbre ( en dehors du boson de Higgs) est le **photon**  $\gamma$  qui transporte la force électromagnétique ) mais ne possède ni masse ni charge.

Le boson  $W^+$  de charge  $+1e$ , le boson  $W^-$  de charge  $-1e$ , et le boson  $Z^0$  qui interviennent dans l'interaction faible et dont la durée de vie est de seulement  $10^{-24}$  s, soit 1/ millionième de milliardième de milliardième de seconde.

Le gluon g sans charge qui intervient dans l'interaction forte (colle des quarks et des nucléons)

Le boson de Higgs  $H^0$  sans charge.

Le graviton G également sans charge.

On peut noter une différence fondamentale entre les fermions (particules de matière) et les bosons (qui transportent les forces) ; c'est la valeur de leurs « **spins** » ; les fermions ont un spin de  $1/2$  , alors que les bosons ont un spin nul ou entier 0, 1, 2.

Il n'est pas possible d'expliquer simplement ce qu'est le spin ; nous dirons que c'est une sorte de moment cinétique (ou de polarisation) des particules mais qui a la particularité de ne prendre que des valeurs discrètes (jamais continues).

[Ne dites surtout pas que vous vous moquez du spin, car c'est grâce à cette « singularité » qu'existe l'Imagerie à Résonance Magnétique \(IRM\).](#)

Il y a beaucoup d'autres particules, qui ne seront pas citées ici, mais il faut savoir que seulement le proton, le neutron, l'électron et le photon sont stables, la plupart des autres ont une durée d'existence infime et se désintègrent immédiatement après leur apparition. La plupart des particules ont leur anti-particule avec lesquelles elles s'annihilent, comme le positon et l'électron.

[Ne dédaignez pas non plus le positon qui est l'anti-électron de même masse mais de charge opposée, c'est celui qui permet aux médecins de réaliser de formidables images 3D dans la Tomographie par Émission de Positons TEP.](#)

Si vous avez lu le mémoire « Pourquoi  $E = mc^2$  » vous devez vous souvenir de l'expérience de Brookhaven où on se sert de la relativité restreinte pour rallonger la vie des muons afin de disposer de plus de temps pour les observer.

Je pense qu'il faut toujours garder à l'esprit que sans la théorie de la relativité, et les accélérateurs de particules comme le LHC de Genève, nous ne saurions rien de tout cela.

## L'aspect quantique :

Quand on parle de particules, on ne peut se contenter du sens commun du mot. Les particules élémentaires sont beaucoup plus complexes que des billes de roulement à billes.

A ce stade, on ne peut éviter d'évoquer, même sommairement, quelques caractéristiques pour le moins troublantes de la physique quantique.

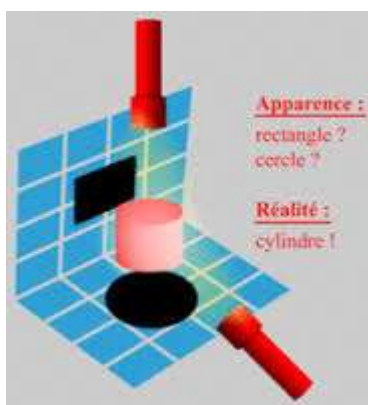
A commencer par la dualité onde-particule, qui faisait déjà l'objet de débat au XVII<sup>e</sup> siècle entre Huygens qui voyait la lumière comme une onde et Newton qui la considérait comme un flot de particules.

Nous savons maintenant que les deux avaient à la fois tort et raison ; le photon comme toutes les particules, est à la fois (ou plutôt, selon les circonstances) onde et/ou particule.

Ce n'est pas facile à avaler et il n'existe aucune façon commode de l'expliquer .

On utilise souvent une métaphore pour imager cette dualité en considérant deux plans verticaux, perpendiculaires et un cylindre dont l'axe est parallèle à un des plans. La projection de ce cylindre sur un des plans donnera un cercle alors que la projection sur l'autre plan donnera un rectangle.

C'est comme si le cylindre avait à la fois la propriété d'un cercle et celle d'un rectangle alors que les deux sont à nos yeux antinomiques.



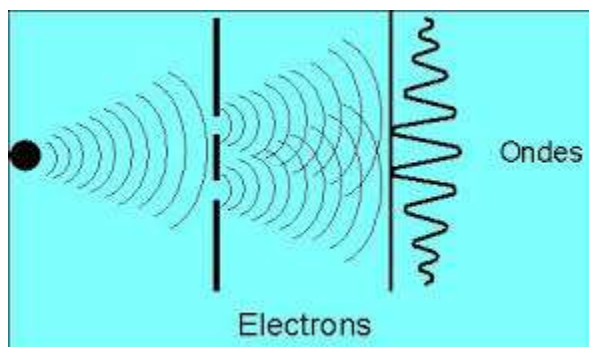
L'analogie est intéressante, car de la même manière onde et particule sont deux façons de voir les objets mais non les objets eux-mêmes.

La célèbre expérience des fentes de Young consistant à éclairer un écran percé de deux fentes très fines et très rapprochées se comportant ainsi comme deux sources secondaires projetant leurs faisceaux sur une plaque photographique, met clairement en évidence, par l'apparition de franges d'interférence, l'aspect ondulatoire.

Mais si on diminue l'intensité de l'émission de manière que la lumière soit émise photon par photon, alors le résultat devient incompréhensible ; car au lieu d' avoir une zone d'impacts plus sombre en son milieu, (comme si on bombardait la plaque photographique avec des billes), on reconstitue petit à petit les fameuses franges d'interférence.

Comment ne pas être dubitatif ; car si on considère la lumière comme étant exclusivement composée de particules, alors les impacts sur la plaque photographique s'expliquent aisément, mais d'où viennent ces franges d'interférence et pourquoi seulement sur certaines zones et pas d'autres ?

L'interprétation de ce qui nous apparaît comme un paradoxe, ne peut être développé ici, mais notons encore, que le phénomène est perturbé par le fait qu'on l'observe.



Ceci nous conduit droit sur ce que l'on appelle « le principe d'incertitude d'Heisenberg » qui dit qu'on ne peut connaître simultanément la position et la vitesse d'une particule. Si l'on s'approche d'une des deux valeurs, l'autre devient imprécise et vice versa.

Cette particularité distingue encore le quantique du classique, car en mécanique classique la dynamique d'une particule est parfaitement déterminée si on connaît à chaque instant sa position et sa quantité de mouvement (quantité de mouvement  $p = mv$ ).

En mécanique quantique, la position ou la vitesse n'est déterminé que quand elle est mesurée.

Seule est vraiment déterminé la distribution statistique de ces valeurs. Ce qui pourrait nous amener à dire qu'un objet quantique peut se trouver à plusieurs endroits en même temps. En réalité cette interprétation erronée vient seulement du fait que les grandeurs scalaires classiques sont insuffisantes pour exprimer la réalité quantique.

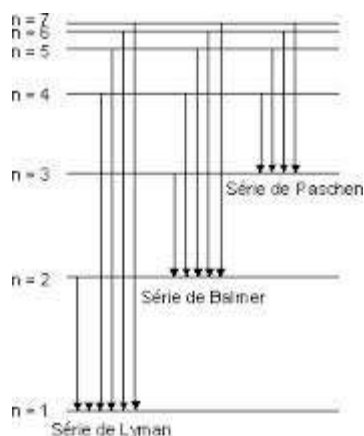
Le comportement de la matière à l'échelle de l'infiniment petit n'est pas déterminé ou prévisible. Les mesures que l'on peut effectuer sur la vitesse et la position de particules subatomiques expriment, non pas des certitudes, mais seulement des probabilités

Le principe d'incertitude (ou d'indétermination) explique, au passage, pourquoi la représentation de l'atome de Borh avec des électrons tournant autour du noyau sur des orbites bien définies est fausse. Car si tel était le cas, on connaîtrait simultanément la vitesse et la position des électrons. Ce qui nous le savons n'est pas possible. C'est d'ailleurs pourquoi, aujourd'hui, l'imagerie atomique représente les électrons comme un nuage flou.... Mais ce n'est encore qu'une image.

Un autre aspect de la physique quantique se manifeste par des grandeurs qui ne peuvent prendre que des valeurs discrètes et leurs multiples ; d'où le terme de « quanta »

Nous en avons une illustration dans la répartition des électrons selon les différents niveaux d'énergie (les couches) qui se positionnent en occupant les places libres en fonction des nombres quantiques liés à leur énergie et à leur moment cinétique.

Sauts quantiques ( on ne peut passer que d'une orbite qu'à une autre, par « quanta »)



Ce que nous venons d'examiner est loin de faire le panorama de la physique quantique, d'autres bizarreries comme le principe de superposition d'états, l'intrication, la corrélation, la réduction du paquet d'ondes, les équation de Schrödinger, Heisenberg, de Broglie ; sans parler des nombreuses applications qui dominent aujourd'hui dans notre quotidien, ne seront pas abordés.

Sans la participation des génies du XX<sup>e</sup> siècles tels que : Max Planck, Niels Bohr, Albert Einstein, Louis de Broglie, Erwin Schrödinger, Werner Karl Heisenberg, Paul Adrien Dirac, Max Born, Enrico Fermi, George Gamow, Richard Phillips Feynman et tous ceux qui, actuellement en exercice continuent d'affiner cette théorie, en particulier pour la faire coïncider avec la théorie de la relativité et réaliser ainsi une théorie du tout, notre monde moderne serait complètement différent.

Imaginez une seconde un monde sans les puissants moyens de transmission actuels, sans téléguidage aérien, sans radio, sans ordinateur, sans téléphone portable, sans télévision, sans GPS, sans les moyens de cartographie du corps humain que sont les scanners, IRM, TEP, ....tout simplement sans électronique et encore plus en avant.... sans transistor...

La physique quantique n'a d'ailleurs pas seulement transformé notre existence ; elle a permis de compléter certaines théories comportant encore des zones d'ombre, et parfaire des disciplines complètes comme la chimie.

Revenons maintenant à notre fameux modèle standard de la physique des particules. Cette théorie du « presque tout »

Equation principale du modèle standard

$$L = -\frac{1}{4}W_{\mu\nu}W^{\mu\nu} - \frac{1}{4}B_{\mu\nu}B^{\mu\nu} - \frac{1}{4}G_{\mu\nu}G^{\mu\nu} + \bar{\Psi}_j \gamma^\mu (i\partial_\mu - gT_j.W_\mu - g'Y_j.B_\mu - g_sT_j.G_\mu)\Psi_j + |D_\mu\Phi|^2 + \mu^2|\Phi|^2 - \lambda|\Phi|^4 - (y_j\bar{\Psi}_{jL}\Phi\Psi_{jR} + y'_j\bar{\Psi}_{jL}\Phi_c\Psi_{jR} + \text{conjugué})$$

Le modèle standard a été soumis depuis sa création aux tests de tous les laboratoires du monde équipés pour le vérifier par l'expérience ; à commencer par le LEP ( le prédécesseur du LHC) où pendant onze ans 1500 chercheurs ont tenté de lui trouver d'hypothétiques failles.

Les cathédrales de technologie que sont les détecteurs du LEP et d'ailleurs, capables de mesurer l'énergie et la quantité de mouvement d'une seule particule avec une précision inouïe, n'ont rien trouvé qui puisse le mettre en cause .... Sauf, un détail : les particules du modèle standard ne sont pas caractérisées par une masse; autrement dit : pour le modèle standard les particules ne peuvent pas avoir de masse et le fait de vouloir introduire la masse dans l'équation principale oblige à violer la « symétrie de jauge »... ce qui condamnerait la théorie.

Cette « impasse » a (semble-t-il) été résolue en 1964 par trois groupes de chercheurs travaillant indépendamment:

- **François Englert et Robert Brout** en Belgique
- **Gérald Guralnik, Carl Hagen et Tom Kibble** à Londres
- **Peter Higgs** à Edimbourg

Une méprise journalistique ( une de plus) a fait que cette avancée théorique a été attribuée seulement à Peter Higgs.

En aparté, je dirais que cette injustice ressemble curieusement au « scandale » de l'attribution en 1962 du prix Nobel à Francis Crick et James Watson, pour la découverte de l'ADN, alors que l'essentiel du travail avait été accompli par Rosalind Franklin dans son laboratoire de cristallographie.

Sans parler de la mésaventure de Jocelyn Bell, la vraie découvreuse du premier pulsar, qui a vu le prix Nobel destiné à cette découverte attribué à son directeur de thèse Antony Hewish alors que celui-ci était persuadé que les signaux découverts par son étudiante étaient d'origine humaine.

### **Boson de Higgs et origine de la masse :**

Ainsi, en 1964, les trois groupes de chercheurs cités plus haut émettent indépendamment, une théorie stipulant l'existence d'un champ scalaire qui emplit la totalité du vide (*dont on sait qu'il n'est pas vide du tout*), et que nous continuerons à appeler, pour simplifier, champ de Higgs. Ce champ représente la condition indispensable au modèle standard pour expliquer la brisure de symétrie qui se manifeste par la portée infinie de la force électromagnétique et la portée très limitée de la force faible.

Depuis longtemps, des physiciens s'interrogent sur l'origine de l'inertie de la matière, qui mesure la force qu'il faut appliquer à un objet pour lui imprimer une accélération donnée.

Le champ de Higgs, intervenant par le biais du mécanisme de Higgs, fournit un élément de réponse en ce sens. Dans cette théorie, c'est le champ de Higgs qui freine les quarks qui composent les objets que nous soulevons, tirons et lançons : La masse inertielle d'une particule résulte donc de son degré d'interaction avec le champ de Higgs.

Autrement dit, les objets ne sont pas intrinsèquement détenteurs de leur masse, celle-ci leur étant en fait conférée par leur interaction avec le champ de Higgs

Ainsi, une particule sans interaction avec le champ de Higgs, comme le photon, aurait automatiquement une masse nulle. Inversement, plus cette interaction serait importante, plus la particule serait « lourde ».

Comme ce résumé semble un peu nébuleux, nous allons utiliser la métaphore du physicien John Ellis. Imaginons notre Univers rempli d'un champ isotrope de neige ( le même partout). Qu'est-ce qu'il se passe si une particule veut traverser le champ de neige-Higgs ?

Si la particule a des skis et donc peu de masse, elle traverse le champ de neige-Higgs très vite et même, si elle n'a pas de masse du tout, elle le traverse à la vitesse de la lumière (c'est le cas des photons). On dit dans ce cas que la particule n'interagit pas avec le champ de neige-Higgs.

Si notre particule a des raquettes, elle aura tendance à s'enfoncer un peu dans le champ de neige-Higgs, elle aura un peu plus de masse et elle ira moins vite. On dit qu'elle interagit avec le champ et qu'ainsi, elle acquiert une masse.

Si maintenant la particule n'a que des chaussures, elle interagit fortement avec le champ ; dès lors il est évident qu'elle va acquérir une masse importante.

Pour compléter l'analogie, si le flocon de neige est l'élément constitutif du champ de neige, le boson de Higgs sera le quantum représentant le champ de Higgs.

Maintenant, si on veut isoler des flocons de neige, il faut secouer le tapis de neige, pour le boson, ce « secouage » correspond aux collisions de protons à très hautes énergies réalisées dans le LHC.

Ainsi les travaux de Brout, Englert, Guralnik, Hagen, Higgs et Kibble ont été confirmés par l'expérimentation qui a fait l'objet de la déclaration du 4 juillet 2012 du directeur du CERN Yves Sirois, montrant par la même occasion que le modèle standard ne comportait pas la lacune que l'on redoutait.



## Tableau récapitulatif des particules élémentaires principales et de leurs caractéristiques :

- 1) les fermions ( particules de la matière) Tous les fermions ont un spin de 1/2  
 1-1) les leptons

Charge électrique	0			-1e ( e = 1,602176487×10 <sup>-19</sup> C )		
Génération	Particule	Symbole / antiparticule	Masse (keV/c <sup>2</sup> )	Particule	Symbole / antiparticule	Masse (keV/c <sup>2</sup> )
1 <sup>re</sup>	Neutrino électronique	$\nu_e / \bar{\nu}_e$	< 0,0022	Electron	$e^- / e^+$	511
2 <sup>e</sup>	Neutrino muonique	$\nu_\mu / \bar{\nu}_\mu$	< 170	Muon	$\mu^- / \mu^+$	659
3 <sup>e</sup>	Neutrino taunique	$\nu_\tau / \bar{\nu}_\tau$	< 15 500	Tau	$\tau^- / \tau^+$	1784200

- 1-2) les quarks

Charge électrique	+2/3 e			-1/3 e		
Génération	Particule	Symbole / antiparticule	Masse (keV/c <sup>2</sup> )	Particule	Symbole / antiparticule	Masse (keV/c <sup>2</sup> )
1 <sup>re</sup>	Quark up	$u / \bar{u}$	2400	Quark down	$d / \bar{d}$	4800
2 <sup>e</sup>	Quark charm	$c / \bar{c}$	1270000	Quark strange	$s / \bar{s}$	104000
3 <sup>e</sup>	Quark top	$t / \bar{t}$	171200	Quark bottom	$b / \bar{b}$	4200000

- 2) Les bosons particules véhicules des forces ou d'interaction

Symbole	Nom	Spin	Charge	Masse en MeV/c <sup>2</sup>	Effet
$\gamma$	Photon	1	0	0	Electromagnétique
$w^+$ $w^-$	Bozon vecteur w	1	+1 -1	80.400	Interaction faible Durée de vie 10 <sup>-24</sup> s
$Z^0$	Bozon vecteur z	1	0	91.200	
g	Gluon	1	0	0	Interaction forte
H <sup>0</sup>	Boson de Higgs	0	0	126	Champ de Higgs
G	Graviton	2	0	0	Gravitation