Les symétries en physique

Harold Erbin

A. Introduction

Le concept de symétrie a émergé dans la physique au cours du XX$^{\mathrm{e}}$, avant de devenir l'un des piliers de la physique moderne : actuellement, les principes de symétries guident presque entièrement l'élaboration des théories, et les théories les plus spectaculaires par leur précision (par exemple la relativité générale ou le modèle standard des particules) se formulent comme des conséquences des symétries. Toutefois, il a fallu une longue réflexion avant de découvrir les symétries sous-jacentes des lois de la physique, ainsi que leurs conséquences, car elles sont rarement explicites.

Avant de commencer, il convient de clarifier ce que j'entends précisément en utilisant le mot "symétrie", car les mathématiciens et les physiciens l'utilisent dans un sens légèrement différents de celui du dictionnaire ; ainsi, une symétrie est une opération qui transforme un système, et l'ensemble des symétries possibles respecte certaines règles :

- il est toujours possible d'inverser une opération ;
- l'opération qui consiste à ne rien faire est possible (on parle de l'opération identité) ;
- deux opérations successives sont équivalentes à une troisième et unique opération.

L'ensemble des symétries possibles forment ce qu'on appelle un groupe.

Il faut alors distinguer la notion d'invariance de celle de symétrie : si une opération laisse le système inchangé, alors on parle d'invariance (on dit aussi que le système est symétrique). Ainsi, il est tout à fait possible d'effectuer une opération de symétrie qui modifie le système. Concrètement, comment savoir si un système est invariant ?

- Du point de vue du physicien, un système est invariant si les mêmes mesures donnent les mêmes résultats, c'est à dire que le comportement ne doit pas changer.
- Quand on dessine une figure sur un papier, alors elle est invariante sous une opération si on peut superposer l'ancienne à la nouvelle (et ce sans tourner une des figures ! sans quoi il s'agirait d'une nouvelle opération).

Généralement, on regroupe toutes les opérations d'invariance dans ce qui est appelé le groupe d'invariance du système [1].

B. Un exemple

Ces définitions peuvent paraitre abstraites, et je vais immédiatement donner un exemple de symétrie : considérons un objet composé d'un triangle d'un côté, d'un rectangle de l'autre (figure 5). On regarde alors le groupe formé des deux opérations suivantes :

- ne rien faire (figure 5a) ;
- faire une symétrie axiale horizontale [2] (figure 5b).

Le système est évidemment invariant sous la première opération, mais pas sous la seconde, comme il est impossible de superposer les deux figures. Par contre, si on refait une symétrie axiale, alors on retombe sur la figure de départ, et on peut dire que

$$\text{symétrie axiale} + \text{symétrie axiale} = \text{identité} \tag{1}$$

En réfléchissant un instant, on obtient les autres combinaisons possibles d'opérations : on peut toujours ne rien faire deux fois de suite, ce qui revient à ne rien faire, et on peut aussi faire une symétrie axiale puis ne rien faire (ou inversement), ce qui revient au final à une symétrie axiale :

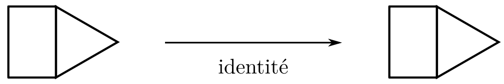
$$\text{identité} + \text{identité} = \text{identité} \tag{2}$$

$$\text{symétrie axiale} + \text{identité} = \text{symétrie axiale} \tag{3}$$

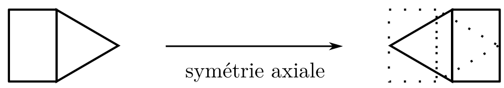
On obtient donc bien un groupe (à deux éléments). Géométriquement, puisqu'il est impossible de superposer toutes les figures obtenues par les différentes opérations, il ne s'agit pas d'un groupe d'invariance. Par contre, si on décide d'interpréter différemment nos figures, par exemple en disant que notre système se comporte de la même manière tant que le triangle pointe à gauche ou à droite, alors le groupe le laisse bien invariant.

Nous voyons déjà ici que la définition même du système est importante lorsque l'on se pose la question de l'invariance.

1. Le physicien utilise souvent le terme "groupe de symétries", au même titre que l'on peut dire d'un système est invariant ou symétrique. Mais il ne faut pas confondre ces notions avec celle plus générale de symétrie.
2. Je précise "horizontale", car on pourrait aussi faire une symétrie verticale, qui présente moins d'intérêt dans le cas présent. Dans toute la suite, l'attribut "horizontal" sera sous-entendu.



(a) Opération d'identité sur la figure.



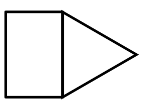
(b) Après l'opération de symétrie axiale, la nouvelle figure n'est pas superposable à l'ancienne.

FIGURE 5 – Symétrie axiale d'un objet quelconque.

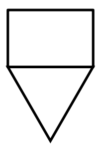
C. Symétries discrètes

Le premier type dont je vais parler — les symétries discrètes — sont les plus intuitives à comprendre, car on en trouve certains exemples dans les mathématiques du collège, et même du primaire : symétrie axiale (renversement d'un objet par rapport à une droite), rotation d'un angle fixé (figure 9, où l'on ajoute une opération "rotation de 90°" à l'exemple précédent), permutations d'objets, etc. Ce type de considérations a permis de classer l'ensemble des cristaux.

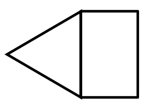
En ajoutant la rotation de 90° à l'exemple précédent, nous nous voyons aussi obligés d'ajouter les opérations de rotations de 180° et de 270°, qui s'obtiennent en effectuant respectivement deux et trois rotations de 90°. L'identité correspond à une rotation de 0° ou de 360°. Finalement, nous pouvons remarquer que lorsque le triangle pointe vers la gauche ou la droite, la symétrie axiale est équivalente à une rotation de 180°, tandis que si le triangle pointe vers le haut ou vers le bas, alors la symétrie axiale est identique à l'identité. L'opération de symétrie axiale est donc superflue, et le groupe possède quatre éléments (figure 9). Le système n'est invariant ni géométriquement, ni selon l'autre interprétation que nous avons donné dans l'exemple. Par contre, le carré sans le triangle sera invariant.



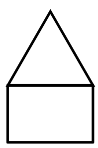
(a) 0°.



(b) 90°.



(c) 180°.

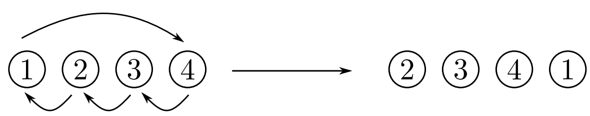


(d) 270°.

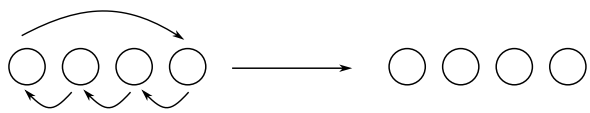
FIGURE 6 – Rotations multiples de 90°.

Nous allons maintenant jeter un œil au groupe des permutations que j'ai mentionné au début du paragraphe. L'idée est de prendre un ensemble d'objets, et de les échanger : par exemple on pourra échanger les nombres d'une liste, échanger la disposition de boules de billard… Nous choisirons ce dernier cas pour fixer les idées. On dispose quatre balles, numérotées de un à quatre, sur une table. Une permutation consistera pas exemple à décaler chaque balle d'un cran vers la gauche, et de mettre la première à la dernière position (figure 7a). Puisque les boules portent un numéro, le système est maintenant différent puisque la boule 1 est différente de la boule 4, et il en sera de même pour toute permutation, donc il ne s'agit pas d'un groupe d'invariance. Par contre, si l'on prend quatre boules totalement identiques, c'est à dire toutes de la même couleur et ne portant aucun nombre, alors on aura bien une invariance car on ne peut pas discerner les boules (figure 7b). Mais un physicien pourra dire que tout ce qui l'intéresse est que la balle 2 est à côté de la 3, la 3 à côté de la 4, etc., en faisant comme si la première et la dernière boule étaient côte à côte. Dans ce cas, la permutation que nous avons montrée laisse invariant le système (mais d'autres permutations, par exemple échangeant uniquement les boules 1 et 2, ne seront pas des invariances).

Ce groupe joue un rôle extrêmement important dans la mécanique quantique : les particules sont classées en deux catégories (bosons et fermions) selon leur comportement par une permutation avec une autre particule identique.



(a) Avec numéros.



(b) Sans numéros.

FIGURE 7 – Permutation de quatre boules de billard. Dans le cas sans couleurs, la situation est identique et le système est invariant.

En physique, on s'intéresse aussi à des symétries discrètes plus abstraites, par exemple celle d'inversion du temps (appelée T) et d'inversion de l'espace (notée P, pour parité). Leur étude est extrêmement intéressante, mais je n'en dirai pas plus dans cet article.

D. Symétries continues

Les symétries continues sont bien plus courantes dans la physique théorique, mais aussi beaucoup moins intuitives au premier abord. Dans les exemples précédents, nous n'avions à notre disposition qu'un nombre fini d'opérations distinctes dans un groupe. Au contraire, la particularité des groupes continus (ou groupes de Lie) est justement de rassembler une infinité d'opérations.

L'exemple le plus simple est celui du groupe des rotations dans le plan, appelé SO(2) par les mathématiciens : il est constitué de toutes les rotations possibles, qui peuvent être très grandes (comme celles de la section précédente), ou aussi petite que l'on veut (si petite que l'œil serait incapable de voir que l'objet a tourné, mais un instrument infiniment précis le pourrait). Nous montrons ce groupe en application sur la figure 8, où plusieurs rotations successives d'un carré sont représentées ; notez que le carré n'est pas invariant : il ne le sera que pour les rotations de $0°, 90°, 180°$ et $270°$, comme nous l'avons vu précédemment. D'ailleurs, pouvez-vous trouver une figure géométrique qui soit invariante ?

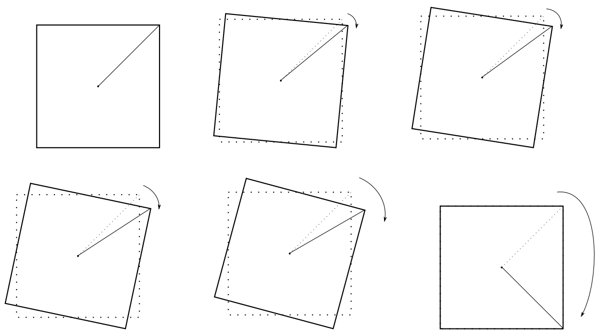


FIGURE 8 – Quelques rotations d'un carré. Rappelons-nous qu'entre chaque rotation dessinée, il est possible d'en obtenir une infinité d'autres.

Il existe de nombreux groupes de Lie, plus ou moins abstraits. Par exemple, le groupe unitaire à une dimension, noté U(1), est très proche de SO(2). Imaginez que chaque objet possède à l'intérieur une sorte de cercle gradué (un petit trait donne la position "zéro"), avec une aiguille donnant une direction. Alors une opération de U(1) consistera à faire tourner cette aiguille de la même quantité pour tous les objets. Le physicien pourra n'être intéressé que par l'écart entre les aiguilles, auquel cas U(1) est bien un groupe d'invariance, puisque déplacer toutes les aiguilles d'une même quantité ne change pas leur différence, d'après la formule simple

$$(a + c) - (b + c) = a + c - b - c = a - b \qquad (4)$$

Le point étonnant est que l'invariance de la physique par ce groupe conduit à l'existence de la charge électrique ! Et, dans une version un peu plus évoluée, ce groupe est responsable de l'existence du photon et des interactions électromagnétiques.

Je n'en dirai pas plus sur les groupes de Lie, car le sujet est vaste et compliqué.

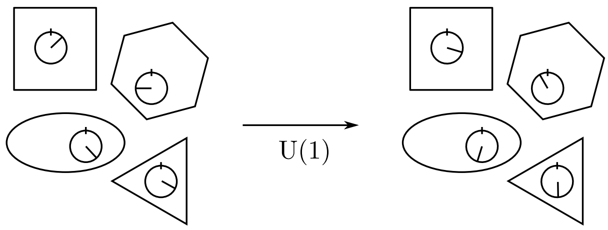


FIGURE 9 – Exemple d'une opération U(1), où nous avons tourné chaque trait d'un sixième du cercle. J'insiste encore sur le fait qu'il ne s'agisse que d'une représentation utile pour permettre à l'esprit de comprendre ce groupe.

E. Conclusion

J'ai donné les clés nécessaires à une compréhension basique des notions de symétries et d'invariance, n'ayant fait que pointer du doigt quelques directions de la physique où les groupes interviennent. En fait, à mesure qu'un étudiant plonge dans les entrailles de la physique, il s'aperçoit que les groupes sont partout et que les prendre en compte permet de simplifier les problèmes étudiés, voire de donner des pistes pour une nouvelle théorie.

J'espère pouvoir écrire un autre article abordant quelques conséquences intéressantes, telles que le théorème de Noether, ou encore expliquant pourquoi il est si difficile de trouver des symétries.

Références

[1] Brian Greene, *L'univers élégant.*

[2] Lee Smolin, *Rien ne va plus en physique ! : L'échec de la théorie des cordes.*

[3] David J. Gross, *The role of symmetry in fundamental physics.*

Les deux premiers éléments de la bibliographie sont des livres de vulgarisation, l'un visant à montrer la théorie des cordes, l'autre à expliquer en quoi il s'agit d'une impasse. Les deux proposent des introductions à la notion de symétrie, ainsi qu'à de nombreux autres concepts.

Symétries de jauge

Harold Erbin

A. Rappels

Cet article est une suite de l'article *Les symétries en physique* paru dans le numéro précédent. Afin de rafraichir les mémoires je vais commencer par quelques rappels.

Une opération de symétrie consiste à transformer un système physique d'une certaine manière (par exemple en le tournant, en le translatant, ou bien d'une manière plus compliquée), et l'ensemble de ces opérations satisfait quelques règles permettant de s'assurer de la cohérence de ces transformations. On dit qu'un système physique est invariant (ou symétrique par abus de langage) sous une opération (de symétrie) s'il n'a pas « l'air de changer ».

Nous avions aussi établi une démarcation entre les symétries discrètes et les symétries continues : les dernières sont définies lorsqu'il est possible d'effectuer deux opérations arbitrairement proches [1] Au contraire un ensemble de symétrie est discret si deux opérations sont strictement séparées, ce qui est généralement le cas quand on peut les "compter" [2].

Nous avions aussi expliqué que ce qui est important est l'orientation relative des différentes parties du système : si j'ai deux triangles disposés côte à côte, et que je les tourne tous les deux d'un certain angle, alors même si leurs positions sur « l'écran » ont changé, leurs positions l'un par rapport à l'autre restent identiques. Et lorsque nous appliquons ce principe à l'univers entier nous voyons qu'il n'y a plus de notion absolue de temps ou d'espace : on dit que l'univers est homogène (si je me déplace en ligne droite alors je ne vois pas de différence) et isotrope (si je tourne la tête pour regarder dans toutes les directions je ne vois aucun changement) [3].

B. Symétries globales, symétries locales

Il est maintenant temps d'introduire une distinction extrêmement importante entre divers types de symétries : jusqu'ici, les opérations dont nous parlions agissaient de la même manière sur l'ensemble du système (c'est-à-dire sur l'ensemble des objets qu'il contient). Pour reprendre l'exemple de la symétrie U(1) [4] du précédent article (figure 1) : chacun de mes objets contient un cercle dont l'origine est en haut et un trait. Puis nous faisons ensuite une opération de symétrie qui consiste à tourner chacun des traits d'un huitième de cercle. Comme seules les différences entre les traits ont un sens physique (dans notre modèle), le système se comportera de la même manière qu'avant l'opération de symétrie, et donc il est invariant.

Pour faire une analogie concrète, c'est un peu comme si chaque objet avait une montre interne, pour laquelle je définis 0h (ou 12h selon le point de vue) comme en étant en haut. Le trait interne indique une certaine heure propre à l'objet (par exemple 3h pour le carré), et mon opération consiste à avancer toutes les montres de 1h30 (le carré se retrouve donc à 4h30), un peu comme le changement d'heure d'été. Mais ce qui est important ce n'est pas l'heure précise indiquée par chacun, mais les différences avec les voisins : ainsi, puisque le carré a 6h de décalage avec l'ellipse avant et après, mon système demeure inchangé.

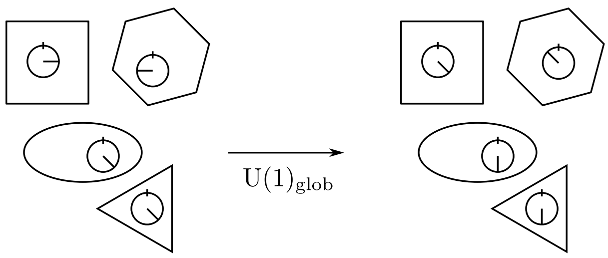


FIGURE 1 – Exemple d'une opération U(1) globale, où nous avons tourné chaque trait d'un huitième du cercle.

Maintenant posons-nous les questions suivantes : que se passe-t-il si j'effectue une opération différente sur chacun des objets de mon système ? Est-ce qu'il est invariant ? Ou pour poser le problème en reprenant nos figures avec des cercles, est-ce que j'obtiens le même système si je déplace le curseur d'un huitième pour le carré et d'un quart pour l'ellipse ?

D'après notre définition de l'invariance, à savoir que seule les différences importent, nous serions tentés de répondre d'emblée que le système n'est pas invariant puisque la différence va changer (e.g. nous passons de 1h30 de décalage à 3h). Mais les physiciens se sont demandés sous quelles conditions il

1. Par exemple si je prends deux rotations d'angles différents, je peux toujours trouver une rotation avec un angle compris entre les deux précédents. Cela est dû au fait qu'il n'y a pas de "trou" dans l'ensemble es nombres réels.

2. Car l'ensemble des nombres entiers (positifs et négatifs) est discret, i.e. il y a une différence finie entre deux de ces nombres.

3. Évidemment cela ne s'applique qu'au niveau fondamental, quand l'univers est presque vide, c'est à dire qu'il ne contient que des particules élémentaires. Lorsqu'un certain nombre de particules se rassemblent – par exemple pour former une étoile – l'étude se complique.

4. Rappelons qu'il s'agit juste d'une sorte de rotation "interne" à l'objet.

serait possible de *restaurer l'invariance*[1] [2] et quelles seraient alors les conséquences physiques. La réponse à ces questions a eu ces implications formidables sur le développement de la physique moderne et se situe au cœur de toutes les théories actuelles. Cette idée est exprimée par le terme d'*invariance de jauge* (qui est un synonyme pour symétrie locale).

Il est possible d'effectuer une opération différente sur chaque objet à certaines conditions, l'une d'elle étant que la transformation appliquée à deux objets voisins soit très "proche"[3].

Faisons appel une nouvelle fois à notre exemple avec les formes géométriques munies d'un cercle interne (figure 2) : cette fois-ci nous autorisons des angles différents pour chaque figure à condition que ces angles diffèrent au plus d'un huitième pour deux voisins :

- commençons par +2 (au curseur de) à l'ellipse ;
- pour l'hexagone nous avons alors le choix entre +1, +2 et +3 puisqu'il est voisin de l'ellipse : prenons +3 ;
- le carré est voisin de l'ellipse – ce qui oblige d'avoir +1, +2 ou +3 –, mais il est aussi voisin de l'hexagone – qui impose +2, +3 ou +4 : il faut donc prendre +2 ou +3, et nous choisissons +2 ;
- finalement le triangle doit avoir +1, +2 ou +3 et nous sélectionnons +1.

Ceci n'est qu'un exemple d'opération possible, mais nous aurions pu prendre une autre combinaison (par exemple en prenant +3 pour le carré) : c'est en ce sens-là que j'ai utilisé le champ lexical associé au choix. Tous les systèmes obtenus avec ces différentes opérations sont équivalents.

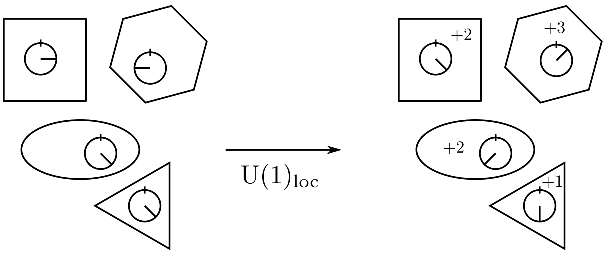


Figure 2 – Exemple d'une opération U(1) locale : chaque trait est tourné d'un certain angle (indiqué en huitième de cercle sur la figure), et la rotation pour deux objets voisins est limitée à une différence de 1.

Nous voyons ainsi que l'invariance de jauge est une structure d'une extrême richesse qui vient imposer de nouvelles contraintes au système. Comme nous l'avons noté plus haut, la majorité des systèmes physiques "intéressants" possèdent des symétries locales : pour ne citer que quelques exemples, ceci est vrai aussi bien pour le modèle standard des particules, que pour la relativité générale ou encore l'hydrodynamique[4] !

C. Champs de jauge

En réalité notre argument précédent est incomplet : un système ne peut pas rester invariant "tout seul" et il est nécessaire d'introduire un nouvel objet, que l'on appelle un "champ de jauge" qui va permettre de compenser les différences dans les opérations entre les voisins. On peut le voir comme une sorte de canal de communications, comme une sorte de "tension", qui permet aux voisins de se "recentrer". C'est en ce sens qu'à chaque symétrie de jauge on associe un (ou plusieurs) champ(s) et une interaction. Les termes sont volontairement vagues jusqu'ici et nous ne développerons pas la théorie beaucoup plus, mais l'idée même exprimée par ces mots est exacte et nous pouvons pousser l'analogie très loin.

Toujours avec le même exemple, nous introduisons sur la figure 3 des flèches indiquant la "communication" entre deux objets voisins.

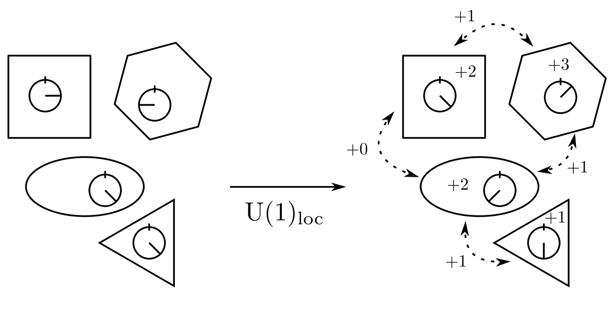


Figure 3 – Il s'agit de la figure 2 à laquelle nous avons ajouté le champ de jauge, symbolisé par les flèches surmontées de nombres.

Ces champs de jauge vont permettre aux objets d'interagir les uns avec les autres, ce qui se traduit par l'existence d'une *force* ; nous venons d'atteindre un nouveau concept-clé. C'est un peu comme si on avait deux réservoirs reliés par un canal (ou encore deux composants électriques reliés par un fil) : la dif-

1. Nous ne saurions trop insister sur ces mots, qui résument l'essence de notre sujet.
2. En fait le développement historique a pris une autre voie, car la théorie de l'électromagnétisme – dont nous reparlerons juste après –, telle qu'elle a été formulée par Maxwell, contenait une certaine *redondance* qui a mené à la découverte du concept de symétrie locale.
3. Nous ne tenterons pas de donner une définition précise de ce que nous entendons par ce terme car ces détails ne sont pas importants pour comprendre l'idée générale.
4. De plus les symétries locales paraissent bien plus naturelles. En effet, les symétries globales posent divers problèmes, en rapport avec la non-localité ou les trous noirs.

férence de hauteur (ou de tension électrique) entre les deux objets va induire une réaction : l'eau (ou le courant) va s'écouler de l'un à l'autre pour rétablir l'équilibre. L'analogie n'est pas fortuite puisque le terme de "jauge" provient justement du vocabulaire de l'électricité et de l'hydraulique. Dans ces domaines on parle d'invariance de jauge pour signifier que l'on peut prendre une origine arbitraire pour mesurer nos hauteurs (ou nos potentiels), car seules les différences sont importantes.

Donnons un autre exemple de champ de jauge, en général méconnu même des physiciens : la Terre a la forme d'une sphère, ce qui se traduit par une symétrie de rotation de la surface de la Terre. Toutefois cette symétrie globale est "détruite" par la rotation de la Terre sur elle-même, mais une symétrie sous les rotations locales subsiste : je peux toujours faire tourner deux lieux très proches d'une petite quantité (différente) sans induire une grande différence. Or d'après ce que nous venons de voir celle-ci peut être compensée par l'introduction d'un champ de jauge, qui est le champ de rotation terrestre. Ce dernier va alors introduire une force (les fameuses forces centripète et de Coriolis). C'est exactement la même chose sur un manège.

La mécanique quantique nous enseigne qu'à chaque champ est associé une particule (dès lors que l'on observe un comportement quantique, évidemment), et alors l'interaction entre deux objets est vue comme un échange entre les deux d'un autre objet. Une image un peu intuitive est celle de deux enfants courant en parallèle : si l'un lance un ballon, l'autre déviera de sa trajectoire en le réceptionnant ; l'idée est globalement la même pour l'interaction électromagnétique (qui sera détaillée dans la section suivante) entre deux particules chargées.

D. Modèle standard

Nous voilà maintenant prêt à appliquer nos nouveaux principes au modèle standard des particules (du moins à une version simplifiée, nous reviendrons sur certains points dans d'autres articles). Le modèle standard possède trois groupes de symétrie, que l'on note $\mathrm{U}(1) \times \mathrm{SU}(2) \times \mathrm{SU}(3)$. Les groupes $SU(N)$ (où N est un entier supérieur ou égal à 2) sont les grands frères du groupe $\mathrm{U}(1)$; leur sens mathématique précis ne nous sera pas utile ici, la seule propriété qui nous intéresse ici est que chaque groupe est associé à $N^2 - 1$ champs de jauge. Les interactions et les particules associées à chaque champ sont les suivantes :

– U(1) : interaction électromagnétique, un champ de jauge (le photon, γ) ;
– SU(2) : interaction faible, trois champs de jauge (Z, W^+, W^-) ;
– SU(3) : interaction forte, huit champs de jauge (les gluons, g).

Le modèle standard est donc simplement la théorie qui décrit l'interaction de la matière avec les divers champs de jauge. Il s'agit de la théorie la plus précise dont nous disposons, puisque certains calculs (comme celui du moment magnétique anormal de l'électron) s'accordent avec les mesures expérimentales avec une précision supérieure à 10^{-11}, ce qui est tout à fait exceptionnel. De plus ce modèle est en (presque) parfait agrément avec les observations, puisque toutes les particules "prédites" ont été observées (la traque s'étant terminée avec la découverte du Higgs en 2012) et seules quelques ombres viennent ternir le tableau.

Finissons par un dernier commentaire afin de préciser la terminologie que l'on retrouve souvent (sans justification précise). Les champs (et les particules associées) sont catégorisées selon leur comportement quand on effectue une symétrie d'espace-temps [1] ; ce comportement est caractérisé par un nombre quantique, appelé *spin* [2] et nous distinguons deux catégories :

– spin entier – *bosons* –, avec encore deux sous-catégories : scalaire (0), vectoriel (1) ;
– spin demi-entier – *fermions* – (1/2).

Seuls ces trois types de champs sont présents dans le modèle standard, car la théorie devient (en général) incohérente pour d'autres valeurs. Les champs de jauge ont toujours un caractère vectoriel et on parle donc de bosons de jauge. Notons que le champ de Higgs (dont nous reparlerons) est un champ scalaire, tandis que la matière est fermionique.

Finalement nous pouvons ajouter un commentaire d'ordre épistémologique : la "raison d'être" profonde des champs de jauge est de permettre l'échange entre les objets ; sans la symétrie locale sous-jacente ils n'existeraient pas.

E. Et la gravitation ?

En cours nous apprenons qu'il existe quatre interactions, et non pas trois comme dans la partie précédente, la dernière étant l'interaction gravitationnelle (décrite, dans sa forme la plus aboutie, par la relativité générale d'Einstein). On entend parfois aussi parler du graviton, qui serait la particule associée et que certaines expériences essaient de détecter. Est-ce que cela s'inscrit correctement dans le formalisme que nous venons de décrire ?

La réponse est positive mais appelle quelques commentaires. En effet le groupe de symétrie de la relativité générale, i.e. le "vrai" groupe de symétrie de

1. Le groupe des symétries de l'espace-temps est le groupe de Poincaré, qui décrit la structure de la relativité restreinte.
2. Qui vient de l'anglais "rotation" : en effet les rotations font partie du groupe de Poincaré. Les autres opérations sont des sortes de rotation entre le temps et l'espace.

l'espace-temps (qui prend en compte la courbure due à la matière, en opposition au groupe de Poincaré qui ne décrit que l'espace-temps vide) est très complexe. De ce fait la théorie doit être un peu modifiée : par exemple le boson de jauge associé possède un spin 2, ce qui conduit à des difficultés pour quantifier la gravité, problème qui n'a toujours pas été résolu [1]. Nous ne pousserons pas plus loin l'étude de la gravité, car cela emmènerait beaucoup trop loin.

F. Conclusion

Le concept de symétrie a toujours fasciné l'homme, et plus particulièrement les physiciens. Celles-ci ont envahi tous les domaines de la physique, et on les retrouve en chimie et en mathématiques.

La construction du modèle standard peut se résumer presque uniquement en terme des symétries et de leurs représentations concrètes, et les symétries sont au cœur de toutes les approches modernes de la physique théorique (supersymétrie, théorie des cordes, gravité quantique à boucle, physique statistique, etc.).

Toutefois bien que nous utilisions en permanence les symétries, a fortiori dans les théories qui sont censées décrire les fondements de la réalité, la question de savoir si les symétries sont réelles en soi ou bien si elles ne sont que des outils commodes pour représenter des phénomènes auxquels nous n'aurons jamais accès reste ouverte. Mais cela rejoint l'éternel débat sur la réalité objective des mathématiques.

Références

[1] Richard Feynman, *Mécanique*, volume 1 et 2, Dunod, 1999 : le chapitre 52 est un modèle de pédagogie et de sens physique ; la leçon 11 aborde aussi les symétries.

[2] Brian Greene, *L'univers élégant*, Folio, 2005.

[3] Lee Smolin, *Rien ne va plus en physique ! L'échec de la théorie des cordes*, Dunod, 2007.

[4] David J. Gross, *The role of symmetry in fundamental physics*.

1. Mais la théorie est parfaitement cohérente au niveau classique, et peut déjà être utilisée, par exemple pour la cosmologie ou les étoiles.