

SÉMINAIRE DE PHILOSOPHIE ET MATHÉMATIQUES

GEORGES LOCHAK

Pierre Curie et la symétrie

Séminaire de Philosophie et Mathématiques, 1995, fascicule 1

« Le centenaire du grand article de Pierre Curie sur la symétrie », , p. 1-16

http://www.numdam.org/item?id=SPHM_1995__1_A1_0

© École normale supérieure – IREM Paris Nord – École centrale des arts et manufactures,
1995, tous droits réservés.

L'accès aux archives de la série « Séminaire de philosophie et mathématiques » implique
l'accord avec les conditions générales d'utilisation (<http://www.numdam.org/conditions>). Toute
utilisation commerciale ou impression systématique est constitutive d'une infraction pénale.
Toute copie ou impression de ce fichier doit contenir la présente mention de copyright.

NUMDAM

Article numérisé dans le cadre du programme
Numérisation de documents anciens mathématiques
<http://www.numdam.org/>

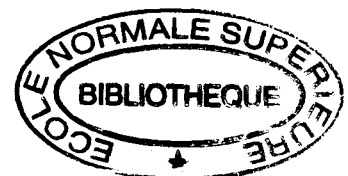
Pierre Curie et la symétrie

Georges Lochak

Fondation Louis de Broglie

J'ai toujours eu le sentiment que la Renommée reste en dette envers Pierre Curie car sa célébrité n'est due qu'à la découverte du radium et que celle-ci occulte le reste de son œuvre, qui n'est pas seulement ignoré du grand public mais de beaucoup de physiciens, même s'ils savent qu'il a découvert la piézoélectricité, que des lois portent son nom en magnétisme et qu'il a fait des travaux sur la symétrie. Sur ce dernier point, ils ne connaissent le plus souvent qu'une loi (la symétrie des causes se retrouve dans les effets), extraite du mémoire dont il sera question ici. Il n'y a guère que les spécialistes du magnétisme, de la cristallographie et de la symétrie qui apprécient l'ampleur de ses travaux et qui savent que Pierre Curie eût été de toute manière un grand physicien même s'il n'avait pas découvert le radium. Marie Curie, elle, n'en doutait pas: il n'est que de lire sa belle Introduction aux *Œuvres* de son mari.

Il y eut, entre la renommée des deux époux, un curieux balancement dû à l'évolution des mœurs et de la mode. De leur vivant, bien qu'ils eussent partagé le Prix Nobel, il fut à l'Académie des Sciences, mais pas elle, bien qu'elle l'eût évidemment mérité, mais cela ne se faisait pas. De même, la rue où se trouve l'Institut du Radium, à Paris, s'appela longtemps "rue Pierre Curie" (même après la mort de Marie) car, pour une rue, seuls les hommes comptaient (les femmes pouvaient, à la rigueur, être aviatrices, martyres ou sufragettes, mais pas quelque chose d'aussi sérieux que "savant"). Marie Curie fut ajoutée plus tard, assez récemment, et non pas, je le crains, parce que les édiles parisiens prirent conscience de sa valeur scientifique, mais simplement parce que la mode avait changé. Cette mode nouvelle, c'était le féminisme et il l'emporta de façon si radicale qu'il fit prendre à Marie Curie des dimensions extra-scientifiques. Une dame parisienne s'occupa de sa biographie. Et c'est l'effigie de Marie Curie fut mise en avant sur le nouveau billet de cinq-cents francs, son mari étant au second plan. Pierre Curie devint un peu son faire-valoir et même son laborantin: "Il faisait ses appareils", dit-on gentiment, comme si c'était sa seule contribution. En fin de compte, non seulement l'œuvre de Pierre Curie fut réduite à la découverte du radium, mais la part qu'il y a prise fut réduite à la portion congrue. Balzac pestait quand on l'enterrait sous Eugénie Grandet mais, au moins sur ce point là, on ne lui contestait pas ses mérites.



Ce n'est donc pas seulement pour des raisons scientifiques, mais aussi pour jeter un tout petit grain dans le plateau de la balance de Pierre Curie, en contribuant un peu à mieux faire connaître son œuvre, que je veux parler du grand mémoire *Sur la symétrie dans les phénomènes physiques*, qu'il écrivit en 1894. Ce mémoire eut un étrange destin qu'il partage avec d'autres, comme la thèse de de Broglie ou le mémoire de Planck sur les quanta: tout le monde sait qu'il existe mais presque personne ne le lit et peu savent ce qu'il contient vraiment. On le réduit, plus ou moins, à quelques lignes, auxquelles je faisais allusion, qui énoncent, il est vrai, une loi fondamentale sur laquelle nous reviendrons, mais pour mieux en parler, nous allons d'abord replacer le travail de Pierre Curie dans l'histoire en essayant de comprendre en quoi il était génial et pourquoi il reste méconnu. Commençons par quelques mots sur la symétrie en général.

La symétrie est présente, en tant qu'élément esthétique, dans toutes les civilisations. Sans nous y étendre, car ce n'est pas notre objet, rappelons que la symétrie règne sur tous les arts, que ce soit par sa présence ou par sa violation manifeste, en peinture, en sculpture, en architecture, en musique, comme dans la danse, la mise en scène théâtrale, la décoration ou l'urbanisme. Souvent, la symétrie introduit un ordre évident: que l'on songe à la Cène de Vinci, à l'Eglise Saint-Pierre de Rome ou à des cas extrêmes comme certaines sonates de Bach ou le poème des Djinns de Hugo. Elle peut aussi être simulée comme sur la façade de l'Institut de France dont la symétrie ne se retrouve pas dans la structure de l'édifice; ou ostensiblement niée comme sur l'Arche de la Défense qui n'est pas dans l'axe des Champs Elysées; ou cachée, comme dans la Cité Radieuse de Le Corbusier, à Marseille, dont la périodicité des appartements est suffisamment compliquée pour échapper à l'œil des habitants et leur éviter un sentiment de répétition.

On peut dire qu'il est rare qu'une vision artistique ne se réfère, sous une forme ou une autre, à la symétrie que notre œil, notre oreille ou notre esprit appelle plus ou moins consciemment. C'est à regret que je me vois contraint d'abandonner ce terrain, mais je ne puis le faire sans mentionner, au moins, la savante symétrie des frises indiennes, grecques et égyptiennes, et celle des mosaïques arabes où l'on retrouve, avec des siècles d'avance, les groupes finis du plan qui jouent un si grand rôle en cristallographie, domaine d'excellence de Pierre Curie.

Mais si la symétrie est, depuis toujours, présente dans l'art, son rôle en science est assez récent et ne date que du siècle dernier. Je sais que cette affirmation est

contestable et qu'il est aisé de me citer de nombreux précurseurs, aussi vais-je le faire moi-même. Commençons par un raisonnement remarquable d'Aristote qui montra que la terre est forcément ronde parce que, son centre se trouvant au centre du monde, les corps pesants doivent s'y accumuler en se poussant les uns les autres de façon isotrope, ce qui conduit à une forme sphérique. Mais le raisonnement de symétrie le plus célèbre, dans l'Antiquité, est celui des corps platoniciens. Du temps où l'on ne connaissait que quatre polyèdres convexes réguliers, la cosmogonie de Platon était basée sur quatre éléments qui leur étaient associés: la *terre*, le *feu*, l'*eau* et l'*air*. Mais lorsqu'on découvrit le cinquième, le dodécaèdre, et que l'on démontra que c'était le dernier, Platon eut une idée géniale qui préfigurait la physique de notre siècle: il intégra le cinquième polyèdre à son système et lui rattacha un nouvel élément, l'*éther*. Nous ne savons pas très bien ce qu'est cet éther, mais ce n'est pas très important. Ce qu'il faut retenir, c'est l'idée extraordinaire d'édifier un système du monde sur des objets géométriques caractérisés par leur symétrie et d'admettre que ce système ne peut être complet qu'en y intégrant tout l'ensemble de ces objets, quitte à imaginer des êtres physiques nouveaux associés aux nouveaux objets mathématiques que la symétrie impose. Bien sûr cette théorie était métaphorique et d'essence plus poétique que scientifique, mais elle était annonciatrice des grandes théories physiques.

Deux mille ans plus tard, le même système de polyèdres fut repris par Kepler, plus connu pour ses fameuses lois du mouvement planétaire que pour sa belle idée cosmogonique qui l'a rendu célèbre en son temps et dans laquelle il montrait que les orbites des six planètes connues à l'époque pouvaient s'inscrire dans des sphères elles-mêmes circonscrites aux cinq corps platoniciens. On pouvait espérer que la cosmogonie de Kepler révélait un ordre caché du mouvement des planètes, reposant sur des grandes lois physiques, mais hélas, la théorie se heurta à deux objections: la première, était que les trajectoires elliptiques que Kepler a lui-même découvertes n'entraient plus très bien dans les sphères; la seconde, plus grave, condamna son système, mais Kepler ne l'a pas su: il y a plus de six planètes. L'idée était belle mais la chance ne lui a pas souri.

Enfin le plus grand exemple est évidemment celui de la cristallographie, mais au lieu de la prendre à ses débuts, je partirai de Pasteur qui se laissa guider par un raisonnement qui constitue peut-être la première ouverture sur l'application des lois de symétrie à la physique et à la chimie. Pasteur était chimiste, et il était, comme le sera plus tard Pierre Curie, un enfant de la grande école française de cristallographie. Son premier exploit fut d'éclaircir l'énigme de l'acide tartrique:

celui qu'on tire de la matière organique naturelle fait tourner le plan de polarisation de la lumière, ce que ne fait pas l'acide de synthèse, bien qu'ayant les mêmes propriétés chimiques.

Pasteur eut l'idée de faire cristalliser l'acide de synthèse et d'observer à la loupe les cristaux obtenus. Il s'aperçut qu'ils formaient un mélange de deux sortes de cristaux de même composition chimique mais dont les formes sont comme l'image l'une de l'autre dans un miroir. Il avait posé un pied sur un nouveau territoire, la *stéréochimie*, et découvert la *chiralité*, c'est à dire la propriété, pour un cristal, une molécule, une particule ou un champ de force, d'être droit ou gauche comme la main et de n'être donc pas identique à son image dans un miroir. L'acide tartrique de synthèse était donc un mélange à parts égales de deux acides, l'un gauche, l'autre droit, tandis que la nature, prouva Pasteur, ne fournissait que l'une des deux formes, d'où son action sur la lumière. Enfin, il sépara à la pince les deux sortes de cristaux dans l'acide de synthèse et s'assura que leur solution dans l'eau fait tourner dans un sens ou dans l'autre la polarisation de la lumière, comme l'acide naturel. Néanmoins, on ne peut pas dire que la nature organique soit droite ou gauche: elle est chirale mais on trouve les deux orientations dans la nature.

La découverte était immense, tant en chimie (voie que Pasteur ne poursuivit pas) qu'en biologie. Il pensa que seule la matière vivante pouvait donner des formes chirales, ce qui allait trop loin car on le fait aujourd'hui par voie de synthèse, mais cette petite erreur lui fut profitable, car il trouva ainsi, dans la capacité d'une solution à faire tourner le plan de polarisation de la lumière, un critère pour reconnaître la présence de la matière vivante. C'est ce qui lui permit de découvrir la présence d'êtres vivants dans les phénomènes de putréfaction ou de fermentation et le mena à la découverte de la bactériologie, qui doit donc sa naissance au décryptage d'une loi de symétrie.

Je disais que Pasteur était l'enfant de l'école française de cristallographie. Mais la cristallographie était encore, à l'époque, une science assez neuve et c'était la seule science qui fît de la symétrie un usage systématique. Ailleurs, elle n'apparaissait qu'occasionnellement, comme en mécanique, où l'on savait depuis Newton que la deuxième loi de Kepler (la loi des aires) provient de l'isotropie de la force de gravitation, ou en calcul des probabilités, où l'on invoquait, sans le dire, un argument de symétrie, pour affirmer qu'un dé a autant de chances de tomber sur une face que sur une autre. Mais un usage systématique de la symétrie supposait qu'on la fît entrer dans une structure mathématique, or cette structure, c'est la théorie des groupes qui la lui donna:

elle se développa au 19^e siècle et c'est à travers la cristallographie qu'elle entra dans les sciences de la nature.

La cristallographie est née à la fin du 18^e siècle avec Romé de Lisle, puis avec René Just Haüy, qui découvrit la forme élémentaire caractéristique d'un cristal, qu'on retrouve, par clivages successifs, dans une suite de formes homotétiques à une "molécule élémentaire", petit cristal ultime, au delà duquel, en poussant le clivage, le cristal serait détruit. C'est en prolongeant cette idée que le cristallographe allemand Seeber, établit un pont entre Dalton et Haüy et imagina la structure atomique des cristaux que Christian Huygens avait entrevue dès le 17^e siècle: autrement dit, comme on le sait maintenant, la molécule élémentaire d'Haüy est constituée de quelques molécules chimiques.

Ces notions jouèrent un rôle fondamental car Haüy comprit que toutes les formes cristallines sont construites à l'aide de molécules élémentaires, qui jouent le rôle de petites briques, et qu'il ne peut y avoir qu'un nombre restreint de formes cristallines fondamentales dans la nature. Il fut aussi le premier à comprendre qu'il ne peut y avoir dans la nature cristalline que des axes de symétrie d'ordre deux, trois, quatre et six, l'ordre cinq étant interdit ainsi que les ordres supérieurs à six¹. Ce sont ces raisonnements qui ouvrirent la porte à la théorie des groupes, mais il fallait encore que les mathématiciens l'érigent en un corps de doctrine et ce n'est qu'à la fin du 19^e siècle que Fedorov et Schönflies purent démontrer que les réseaux atomiques cristallins admettent 230 de groupes de transformations, à l'aide desquels on peut reconstituer les milliers de formes cristallines existant dans la nature.

C'est ici qu'arrive Pierre Curie. Il est né en 1859, et avait donc vingt et un ans lorsqu'il commença ses premiers travaux, en 1880, avec son frère aîné Jacques. Les deux frères, forts de leurs connaissances en cristallographie, posèrent pour la première fois la question suivante: *connaissant la symétrie d'un cristal, peut-on en inférer certaines propriétés physiques?* Cette question capitale ouvrit une nouvelle ère de la science en faisant de la symétrie un instrument de découverte.

Les frères Curie s'attaquèrent à un exemple particulier: celui d'un cristal qui possède un axe de symétrie mais pas de centre, autrement dit, un axe qu'on n'a pas le droit de retourner, ce que Pierre Curie appelait la symétrie du tronc de cône et que nous appellerions la symétrie d'un vecteur. Ils remarquèrent que si l'on comprime un tel cristal le long de son axe, il est possible qu'une polarisation électrique apparaisse dans cette direction. Rien ne leur permettait d'affirmer que la polarisation existe. L'absence de centre rend la prédiction possible, mais elle

¹ Nous ne nous arrêterons pas ici sur les symétrie approchées d'ordre cinq dans les quasi-cristaux.

aurait pu être fausse pour différentes raisons: le phénomène aurait pu être trop faible, ou nécessiter quelque agent extérieur qui ne change pas la symétrie, comme une élévation de température, etc.

Pierre et Jacques Curie firent une liste de minéraux susceptibles de posséder la propriété. Ils les essayèrent en comprimant un cristal et en recherchant sa polarisation à l'aide d'un électromètre. Le résultat fut positif et ce fut la découverte de la piézoélectricité. Ils ne tardèrent pas à montrer que, de tous les cristaux qu'ils avaient identifiés, le meilleur pour les applications était le quartz. Encore ignoraient-ils qu'il serait, un jour, fabriqué à foison. Le fait que Pierre et Jacques Curie découvrirent la piézoélectricité est connu mais ce qui l'est moins, c'est la manière dont ils l'ont découverte, à partir de l'idée théorique qu'en partant d'une loi de symétrie il est possible de prévoir un phénomène. Cette idée devait murir dans l'esprit de Pierre Curie pendant de longues années.

Les deux frères furent séparés par le hasard des nominations. Jacques fut nommé à Montpellier, Pierre resta à Paris et travailla seul. Quatorze ans plus tard, en 1894, quatre ans avant la découverte du radium et même deux ans avant celle de la radioactivité, il s'était déjà acquis une réputation scientifique, notamment grâce à ses travaux sur le magnétisme et sur la symétrie, problème qui hanta sa trop courte vie. Il n'avait encore travaillé que sur la symétrie des cristaux, mais cette année là, en 1894, il écrivit son grand mémoire intitulé: "*Sur la Symétrie dans les phénomènes physiques, symétrie d'un champ électrique et d'un champ magnétique.*" Ce mémoire fit date car, pour la première fois, un physicien transposait les raisonnements de symétrie de la cristallographie à l'ensemble de la physique. Le programme était annoncé dans la première phrase dont la modestie et la prudence ne laissent pas deviner l'ampleur et le destin:

" Je pense qu'il y aurait intérêt à introduire dans l'étude des phénomènes physiques les considérations sur la symétrie, familières aux cristallographes."

Le mémoire n'est pas facile à lire, pour plusieurs raisons. La première est que c'est l'article d'un cristallographe pour qui tout est évident dans ce domaine: si l'on n'y appartient pas, on manque de certaines bases et l'on éprouve des difficultés avec la terminologie, même si l'on connaît la théorie des groupes, car les mots de Curie ne sont pas toujours les nôtres. Mais la principale difficulté est que, l'article étant fondateur, Pierre Curie reprend tous les problèmes à la base et raisonne comme s'il ne connaissait, de la physique, que les faits expérimentaux. Il

est curieux de voir que, dans cet article, il y a quelques dessins, une nomenclature, mais pas de formules mathématiques. Aujourd'hui, les ouvrages (peu nombreux) qui parlent de la symétrie du champ électromagnétique raisonnent à partir des équations de Maxwell, que Pierre Curie connaissait, bien sûr, mais ces équations ne font que résumer ce que nous savons de l'électromagnétisme, et c'est pourquoi Curie ne regardait que l'expérience, en essayant de s'élever au dessus des fait d'observation pour en induire des lois de symétrie. S'il lui faut plusieurs pages pour trouver la symétrie d'un champ électrique ou magnétique c'est parce qu'il ne part pas de la théorie mais de l'expérience. Aussi ses conclusions sont-elles plus sûres que celles des meilleurs traités actuels qui prennent les choses de plus haut et se permettent une certaine désinvolture vis à vis de l'expérience, mais c'est parce que Pierre Curie est passé par là et que sa science nous est restée, même si on ne lit plus guère son mémoire, et qu'on ne le cite, le plus souvent, que de confiance ou par ouï-dire.

Mais avant de parler d'électromagnétisme, il fit la nomenclature de ce qu'on devrait appeler les *groupes de Curie*, comme on dit les groupes de Fedorov et de Schönflies en cristallographie: c'est la nomenclature des transformations de l'espace qui peuvent conserver un phénomène physique. Entreprise difficile qu'il mena pas à pas en imaginant toutes les transformations possibles, en s'efforçant de n'en point omettre.

Son expérience des cristaux lui a évidemment servi mais le problème était très différent. En effet, la symétrie des cristaux est celle d'un milieu périodique: le *réseau cristallin*. Or cette périodicité réduit beaucoup le nombre de symétries possibles. En effet, imaginons un cristal simplement formé par l'entassement régulier et indéfini de petites billes, comme l'avaient déjà imaginé Kepler et Huygens: chacune de ces petites billes peut être supposée sphérique mais il n'est évidemment pas possible que le cristal lui-même possède la symétrie sphérique, c'est à dire qu'il se reproduise identique à lui-même en tournant d'un angle quelconque autour de n'importe quel axe¹: il suffit d'entasser des billes pour voir qu'elles forment une pyramide. Nous avons dit, plus haut, que le nombre de répétitions possibles d'un réseau cristallin autour d'un axe est, en réalité, très restreint. Mais rien n'empêche un phénomène physique, une force, une loi, un objet isolé, de posséder un axe autour duquel il se reproduit à l'identique en tournant d'une fraction quelconque de tour, voir d'un angle quelconque et d'avoir ainsi un axe de révolution, comme un cylindre, un champ électrique

¹ Ce serait si absurde qu'il y a une devinette plaisante des étudiants en minéralogie: "*Dans quel système cristallise la naphaline?*" Réponse: "*Dans le système sphérique*".

uniforme, ou une ampoule sphérique remplie d'un liquide doué de pouvoir rotatoire (comme l'acide tartrique de Pasteur). On peut, de même, trouver une symétrie sphérique: comme une bulle de savon, une ampoule de verre, ou la force de gravitation d'un point matériel.

Les groupes de Curie sont donc différents de ceux de Fedorov, même s'ils les retrouvent, dans des cas particuliers. Curie fut ainsi amené à introduire des symétries jusque là inhabituelles comme la symétrie axiale d'une flèche ou celle d'un fil tordu, qui lui seront nécessaires en électromagnétisme. Il aboutit à une nomenclature assez longue, divisée en *sept classes subdivisées en dix-neuf familles*, qu'il exprime dans le langage de la cristallographie et qu'il illustre par des exemples, en citant, chaque fois qu'il le peut, les symétries cristallines.

C'est alors qu'il énonce son programme sous la forme de deux propositions¹:

1-ière proposition:

"La symétrie caractéristique d'un phénomène est la symétrie maximale compatible avec l'existence du phénomène.

Un phénomène peut exister dans un milieu qui possède sa symétrie caractéristique ou celle d'un des sous-groupes de sa symétrie caractéristique."

Et il ajoute cette importante remarque:

"Autrement dit, certains éléments de symétrie peuvent coexister avec certains phénomènes, mais ils ne sont pas nécessaires. Ce qui est nécessaire, c'est que certains éléments de symétrie n'existent pas. C'est la dissymétrie qui crée le phénomène."

Il fait même observer qu'il serait plus logique de faire la liste des dissymétries plutôt que des symétries mais que celle-ci est évidemment plus simple. Vient alors la loi que tout le monde connaît:

2-ième proposition:

"Lorsque certaines causes produisent certains effets, les éléments de symétrie des causes doivent se retrouver dans les effets produits.

Lorsque certains effets révèlent une cause de dissymétrie, cette dissymétrie doit se retrouver dans les causes qui lui ont donné naissance." (proposition inverse de la précédente)

Mais, ajoute Curie: "...les effets produits peuvent être plus symétriques que les causes. Certaines causes de dissymétrie peuvent avoir une action trop faible pour être appréciée." Nous le disions déjà de la piézoélectricité: l'absence de centre dans un cristal ne rendait pas le phénomène nécessaire, mais seulement possible.

¹ J'ai remplacé, dans le texte, les mots "minima" et "intergroupe" par les expressions actuelles: "minimal" et "sous-groupe"

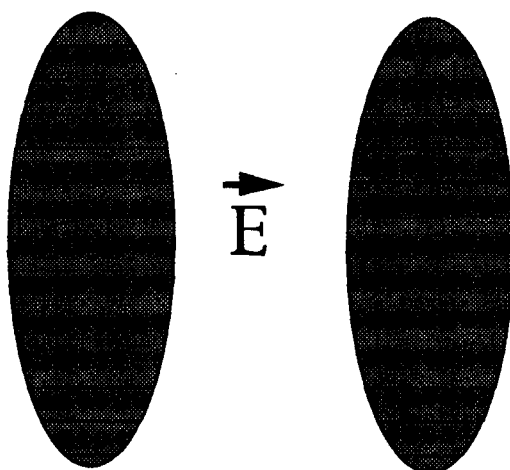
Cela étant, on ne peut s'empêcher de penser que Pierre Curie va peut-être un peu loin dans son insistance au sujet de *"la dissymétrie qui crée le phénomène"*. C'est une idée incontestablement profonde et même prémonitoire, car elle annonce l'importance que nous attachons aux défauts et aux brisures de symétrie. Mais ce n'est la réponse qu'à un type de question: *si je veux obtenir un certain phénomène, quelle est la symétrie maximale de la cause?* C'est la question que se posèrent les frères Curie à propos de la piézoélectricité et Pierre Curie en est resté imprégné, mais le physicien est plus souvent confronté au problème inverse car il se trouve devant un phénomène produit par une certaine cause (une force, un champ, un milieu matériel, un dispositif expérimental) et il cherche la symétrie du phénomène, connaissant celle de la cause et sachant (Curie le lui a enseigné) qu'elle doit se retrouver dans les effets. Et il sait aussi (depuis Curie) que la symétrie de l'effet peut être plus grande que celle de la cause et qu'il faudra d'autres expériences pour identifier ou éliminer les symétries supplémentaires. Du reste, c'est exactement ainsi qu'agit Pierre Curie lui-même dans la suite de l'article, consacrée à la symétrie des champs électrique et magnétique. La vérité est dans une balance plus ou moins égale entre la première tendance, sur laquelle insiste Curie, et la tendance inverse qui est aussi la sienne à d'autres moments.

Pour mieux le comprendre, il faut se rappeler qu'une vingtaine d'années plus tard, Emmy Noether a démontré un fameux théorème qui stipule que *les lois de symétrie impliquent des lois de conservation de certaines grandeurs physiques* : par exemple, si une loi de mouvement est invariante par translation, l'impulsion se conservera, si elle est invariante par rotation autour d'un axe, c'est le moment d'impulsion autour de cet axe qui se conservera etc. En réalité, aussi bien les lois de symétrie que de conservation nous conduisent à rechercher des bilans: si une symétrie est moindre, ou plus forte que celle attendue, si une grandeur réputée conservative paraît s'être en partie créée ou annihilée, notre attention sera en alerte et nous chercherons où le "reste" est passé. C'est ainsi qu'a réagi Pasteur avec l'acide tartrique de synthèse, qui lui est apparu plus symétrique qu'il ne devrait. C'est ainsi qu'a réagi Pauli, surpris que les noyaux radioactifs bêta émettent des électrons avec un large spectre d'énergie, et qui s'est demandé si une partie de cette énergie n'avait pas disparu, emportée par une particule inconnue, le *neutrino*, dont l'existence fut, plus tard, confirmée. Et de même, toujours à propos de la radioactivité bêta, Lee et Yang se sont un jour demandé, en faisant un bilan, si on ne lui attribuait pas plus de symétrie qu'elle n'en a, et ce fut la découverte de la *non conservation de la parité*, autrement dit la chiralité du phénomène, dont nous reparlerons. Dans ces trois cas - et dans

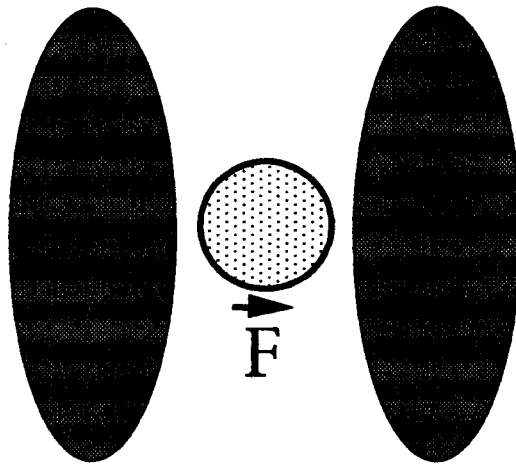
d'autres - c'est un bilan de symétrie ou de conservation d'une grandeur qui aboutit à la découverte. Et peu importe, en définitive, qu'on cherche la symétrie maximale d'une cause compatible avec un effet donné ou la symétrie minimale d'un phénomène en partant de la symétrie de la cause qui l'a produit.

Mais la chose la plus profonde que Pierre Curie fut le premier à apercevoir, c'est que la symétrie de l'espace est modifiée par les actions physiques et, en particulier, que là où règne un champ électromagnétique, une portion d'espace change de symétrie. Cette découverte est dans l'esprit de la physique du 20^e siècle qui vit le triomphe des lois de symétrie. C'est pourquoi, plus encore que la gravitation ou la notion générale de force, c'est l'électricité et le magnétisme qu'il prend pour terrain d'essai de sa théorie de la symétrie. Je voudrais montrer quelques uns de ses raisonnements.

Pour trouver la symétrie du champ électrique, il commence par prendre le champ créé entre deux plateaux métalliques circulaires parallèles, sous tension:

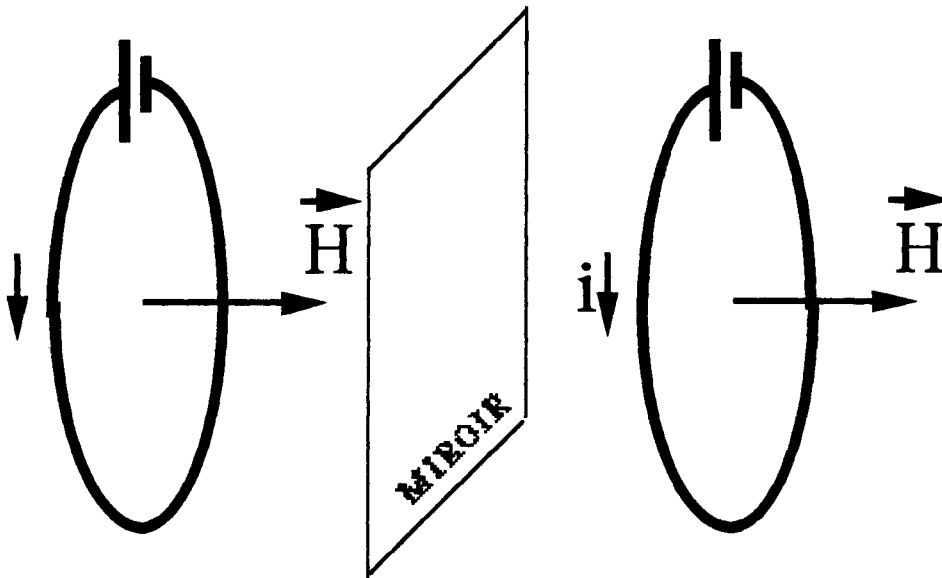


La symétrie de la cause - les plateaux - doit se retrouver dans l'effet: le champ, qui aura donc l'axe des plateaux pour axe de révolution, et tout plan contenant cet axe sera un plan de symétrie: c'est la symétrie d'un cône. Mais la symétrie pourrait être plus grande: le champ pourrait avoir un axe normal au premier. Pour cela, Curie considère une sphère conductrice chargée, isolée dans l'espace: comme elle est conductrice, elle reste isotrope malgré la charge, car elle se répartit uniformément dans tout le volume. Introduisons alors la sphère entre les plateaux, donc dans le champ, qui exercera sur elle une force :



L'ensemble de la sphère chargée et de la force n'a plus la symétrie sphérique que possédait la sphère isolée: il n'y a plus qu'un seul axe de symétrie, le même qu'avant, les autres ont disparu. Cette perte de symétrie doit se retrouver dans la cause: l'ensemble de la sphère et du champ. Or la sphère a conservé sa symétrie car, étant conductrice, le champ ne la polarise pas. Donc la perte des axes de symétrie transverses, est due au champ, qui n'a donc pas d'axe orthogonal à l'axe. Et il n'a pas de plan de symétrie orthogonal sinon l'intersection de ce plan avec un plan de symétrie porté par l'axe serait un axe orthogonal et nous venons de voir qu'il n'y en a pas: le champ électrique est donc représentable par un vecteur.

Voyons le champ magnétique. Curie considère le champ créé dans l'axe d'une spire conductrice circulaire parcourue par un courant:



Prenons un plan de symétrie parallèle à la spire. L'image sera identique à l'objet, puisque l'image d'un cercle est un cercle et que le sens du courant ne

change pas (vecteur parallèle au miroir): la cause du phénomène est invariante par symétrie et l'effet le sera également. Le champ magnétique possède donc un plan de symétrie *orthogonal* à sa direction (contrairement au champ électrique). En d'autres termes, il est identique à son image dans un miroir qui lui est perpendiculaire, comme le personnage d'un tableau de Magritte, qui se regarde dans un miroir et voit sa nuque au lieu de son visage. On montre, de même, que si le champ est parallèle au miroir, son image est dirigée en sens inverse: le personnage change de profil (Magritte n'y a pas pensé). D'autres raisonnements de Curie, eux aussi fondés sur l'expérience, montrent que, bien que le champ magnétique possède un plan de symétrie orthogonal, il ne possède pas d'axe orthogonal, ce qui entraîne que, contrairement au champ électrique, il ne possède pas de plan de symétrie parallèle à la direction du champ. Cela signifie que le champ magnétique n'est pas représentable par un vecteur car sa symétrie n'est pas celle d'un cône mais d'un cylindre tournant. Pourtant (Curie le déplore) nous gardons la même représentation que pour le champ électrique, en disant seulement que le vecteur électrique est *polaire* et le vecteur magnétique *axial*.

Une fois établie la symétrie d'un champ électrique ou magnétique, Curie explique, par des raisonnements généraux, certains effets remarquables comme l'effet Hall qui consiste en l'apparition d'une tension électrique entre les bords d'un ruban conducteur parcouru par un courant et placé dans un champ magnétique; ou encore les effets Wiedemann:

- On aimante un fil de fer dans le sens de la longueur et on le fait parcourir par un courant électrique: le fil se tord.
- On aimante le fil et on le tord: il apparaît une tension électrique entre ses extrémités.
- On le fait parcourir par un courant et on le tord: il s'aimante.

Curie montre qu'un champ électrique et un champ magnétique pris ensemble forment un objet *chiral* qui possède une symétrie de torsion responsable des effets observés.

Il cherche ensuite la symétrie d'un pôle magnétique et montre que, contrairement à une charge électrique, qui est identique à son image dans un miroir, l'image d'un pôle nord est un pôle sud et inversement: *un pôle magnétique est lui aussi un objet chiral*. Et Curie pose d'une manière nouvelle un problème soulevé avant et après lui par d'autres auteurs (parmi lesquels Maxwell et Dirac): existe-il des charges magnétiques libres, des pôles qui ne

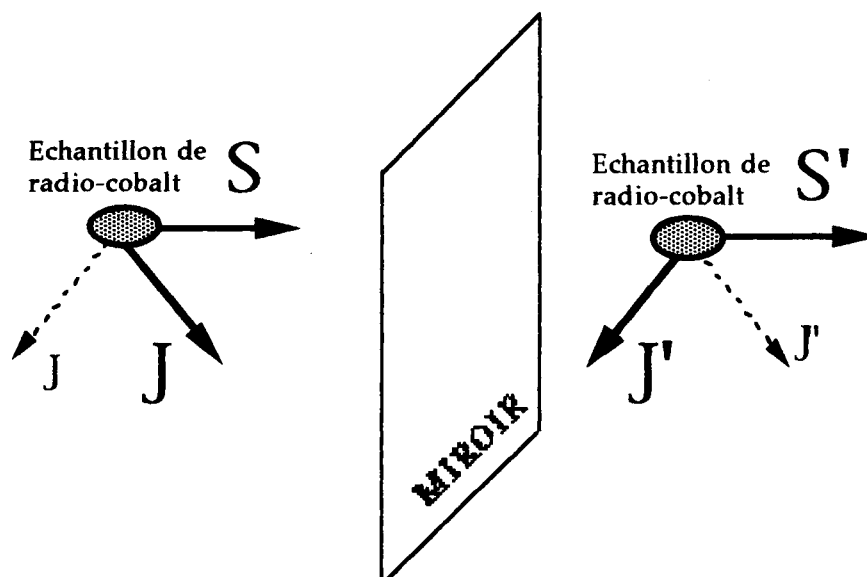
seraient pas réunis par paires nord-sud comme dans un aimant, des *monopôles* magnétiques? Il décrit en détail la symétrie des phénomènes qui s'ensuivraient, ainsi qu'une expérience, réalisée sans succès mais qui ne prouve évidemment pas que la particule en question n'existe pas. Les recherches en ce sens se poursuivent encore; en particulier, l'auteur de ces lignes a donné l'équation d'onde quantique relativiste à laquelle doit obéir un monopôle magnétique. Cette équation, analogue à celle de l'électron de Dirac, montre que les propriétés chirales du monopôle, bien qu'en accord avec les lois de Curie, ne peuvent être décrites en physique classique car elles sont liées à la *polarisation* de l'onde associée au monopôle. Mais le monopôle n'est toujours pas observé!

On ne saurait quitter ce monde de la symétrie, dont Pierre Curie fut l'un des grands visionnaires, sans évoquer la suite de cette histoire, que je voudrais illustrer en racontant brièvement la découverte de la *non conservation de la parité dans les interactions faibles*¹, à laquelle nous avons déjà fait allusion et qui prouve l'importance, dans la nature, de cette chiralité chère à Pasteur et à Curie. Cette propriété, prévue théoriquement par Lee et Yang en 1956, signifie que le phénomène de la radioactivité bêta n'est pas identique à son image dans un miroir. Mais comment "voir" la radioactivité dans un miroir?

L'expérience cruciale de Mme C.S. Wu (1957) consiste en une mesure de la radioactivité bêta du cobalt 60. Cet atome possède un spin: il est comme un aimant qui s'oriente dans un champ magnétique et se caractérise par un vecteur axial S analogue à celui qui représente un champ magnétique: ce vecteur est identique à son image dans un miroir perpendiculaire. On oriente donc un échantillon de radio-cobalt dans un champ et on mesure l'intensité de la radioactivité dans toutes les directions: cette intensité directionnelle se représente (comme la vitesse des particules radioactives) par un vecteur polaire J analogue à celui du champ électrique. Or, nous savons déjà que l'ensemble de deux tels vecteurs, respectivement axial et polaire, est un objet chiral.

Prenons alors, à gauche du miroir, sur l'échantillon de cobalt, le vecteur S qui représente le spin, et un vecteur J qui représente l'intensité du rayonnement dans une certaine direction. A droite du miroir, l'angle entre les vecteurs-images S' et J' ne sera pas le même qu'à gauche parce que, S étant axial et J polaire, leurs images sont tournées autrement et l'angle entre S' et J' est le supplément à 180° de l'angle entre S et J :

¹ Les physiciens des particules appellent "*nonconservation de la parité*" la chiralité (le fait d'être droit ou gauche) et "*interactions faibles*" celles qui interviennent dans la radioactivité bêta.



Regardons maintenant (à droite du miroir) le vecteur pointillé J' qui est orienté par rapport à S' sous le même angle que J par rapport à S : il n'est pas l'image de J , mais du vecteur J , en pointillé à gauche, qui est orienté par rapport à S sous le même angle que J' par rapport à S' .

Que peut-on conclure de cela? Les deux vecteurs J et J' représentent simplement l'intensité du rayonnement émis par l'échantillon de radio-cobalt sous deux angles (par rapport à S) dont la somme est 180° : pour que le phénomène tout entier soit identique à son image dans le miroir, il faut que l'image (à droite) du rayonnement émis sous deux tels angles soit de même intensité que sur l'échantillon (à gauche). Mais les images sont permutées: c'est J' qui est sous le même angle que J (par rapport à S ou S') et J' qui est sous le même angle que J : donc, pour que l'image soit identique au phénomène observé, il faut que, sur l'échantillon, l'intensité du rayonnement soit la même dans les deux directions J et J' , or les intensités mesurées sont nettement différentes.

La radioactivité bêta n'est donc pas identique à son image dans un miroir et l'interaction faible est un phénomène chiral ou, comme on dit, il ne conserve pas la parité.

Cette découverte fit l'effet d'une bombe. Pourtant, les physiciens savaient que la chiralité existe en chimie, en cristallographie, en biologie mais ils n'avaient jamais pensé qu'une loi fondamentale de la nature, l'une des quatre grandes forces que nous connaissons, puisse être chirale. C'était un peu comme la tendance aristotélicienne à admettre que la terre puisse être corruptible mais pas les cieux... Ce préjugé nous habitait tous et je me rappelle très bien l'étonnement général et mon propre étonnement, ainsi que les interminables discussions qui

s'ensuivirent dans les séminaires. On raconte que Pauli s'exclama, quand il apprit l'hypothèse de Lee et Yang: "Je ne peux pas croire que Dieu soit gaucher...". On remarque avec amusement un préjugé supplémentaire: il était quand-même encore plus grave que Dieu fût gaucher que droitier! Et pourtant, il l'est.

Il reste trop à dire dans l'espace d'un article ou d'un séminaire et je ne puis que renvoyer à la bibliographie donnée ci-dessous, qui, elle-même est trop brève. Disons seulement, pour conclure, que la capacité prévisionnelle de la symétrie fut, pour Pierre Curie, l'idée de sa vie, celle qui, dans sa jeunesse, l'avait conduit à la découverte de la piézoélectricité et à laquelle il ne cessa de réfléchir. L'article sur *La symétrie dans les phénomènes physiques* ne procède pas d'un trait de génie mais d'une lente maturation et cette projection, sur l'ensemble de la physique, des "*considérations sur la symétrie familières aux cristallographes*", annonçait l'une des grandes idées scientifiques du 20^e siècle et l'invasion de la physique par la théorie des groupes et les lois d'invariance, à travers les deux voies d'accès que furent la relativité et la mécanique quantique [6].

Je terminerai par une citation de Chen Ning Yang qui résume l'évolution de la physique après la mort de Pierre Curie. Outre qu'il fut le co-découvreur de la non-conservation de la parité, Yang fut l'initiateur des théories dites "de jauge", sorte de procédé général qui tente, en mécanique quantique, de prévoir de nouvelles lois d'interaction à partir de nouvelles lois de symétrie. Il fit, en 1979, à l'occasion du centenaire d'Einstein, un séminaire d'où est extrait ce passage:

"Le premier grand principe de symétrie en physique fondamentale a été l'invariance de Lorentz, découverte comme propriété mathématique des équations de Maxwell, lesquelles furent fondées sur les lois expérimentalement observées de l'électromagnétisme. Puis, en partant de l'invariance de Lorentz, Minkowski a exigé que toutes les équations de champ soient covariantes par rapport à cette loi de symétrie, ce qu'on peut résumer dans le tableau suivant:

expérience $\Rightarrow$ équations de champ $\Rightarrow$ symétrie
(avant Einstein et Minkowski)
symétrie $\Rightarrow$ équations de champ $\Rightarrow$ expérience
(après Einstein et Minkowski)

La puissance et des lois de symétrie et de leurs conséquences physiques fit grande impression sur Einstein. Il s'attaqua à une généralisation de l'invariance de Lorentz qui l'amena, conjointement avec le principe d'équivalence, à la théorie de la relativité générale. On peut

affirmer que c'est Einstein qui introduisit, par là-même, un nouveau principe: les interactions dictées par la symétrie.

Si Pierre Curie avait écrit cela, peut-être aurait-il dit que les interactions sont *conditionnées* par la symétrie, plutôt que "dictées". Mais comment, lorsqu'on connaît la suite de l'histoire, ne pas déplorer sa disparition accidentelle, en 1906, dans la force de l'âge? Il fut, de justesse, le contemporain de la relativité, j'ignore si elle eut le temps d'attirer son attention, et surtout, il n'en connut pas le développement. Et comment savoir sa réaction devant cette physique nouvelle? Comment savoir, également, alors qu'il appartenait à l'autre siècle et fut nourri de physique classique, quelle eût été sa réaction devant le monde étrange des quanta? Il aurait passé la soixantaine au grand moment de la mécanique quantique, sans doute trop tard pour qu'il puisse y jouer un rôle et peut-être même pour l'accepter.

C'est peut-être pour cela, pour une raison de date, que ce mémoire-charnière, venu trop seul et trop tôt dans l'histoire, n'a pas joué le rôle qu'il aurait dû et n'a pas eu la renommée qu'il méritait. Les hommes de l'ancienne physique n'en ont probablement pas aperçu la portée et ceux de la physique nouvelle n'étaient pas encore là. Pour qu'une œuvre scientifique s'impose, la valeur ne suffit pas, il faut qu'elle ait la chance de venir au bon moment.

Bibliographie.

- [1] P. Curie, *Sur la symétrie dans les phénomènes physiques*, J. de Phys., 3^e série, t. III, 393, 1894, suivi de: *Sur la possibilité d'existence du magnétisme libre*, id. p. 415; réédition: Annales de la Fondation Louis de Broglie, **19**, 137, 1994.
- [2] P. Curie, *Œuvres* (Préface de Marie Curie), Editions du C.N.R.S., Paris.
- [3] H. Weyl, *Symétrie et Mathématiques modernes*, Flammarion (N.B.S.), Paris, 1964.
- [4] H. Weyl, *The Theory of Groups and Quantum mechanics*, Dover, New-York.
- [5] *La Symétrie aujourd'hui* (par 13 auteurs, avec Emile Noël), Seuil, Paris, 1989.
- [6] G. Lochak, *La Géométrisation de la Physique*, Flammarion (N.B.S.), Paris, 1994 et Flammarion ("Champs"), 1996.