

# Pierre Curie et la symétrie

**A**vec le développement de la relativité et de la mécanique quantique, le XX<sup>e</sup> siècle a vu triompher les lois de symétrie en physique. Il y a cent ans, bien avant la naissance de ces théories, Pierre Curie publia, dans le *Journal de physique*, un article intitulé *Sur la symétrie dans les phénomènes physiques, symétrie d'un champ électrique et d'un champ magnétique*. La première phrase de l'article, modeste et prudente, révèle la nouveauté de la question et elle prend, avec le recul du temps, une étrange résonance, tant l'idée nous paraît aujourd'hui évidente : «Je pense qu'il y aurait intérêt à introduire dans l'étude des phénomènes physiques les considérations sur la symétrie familières aux cristallographes.»

Bien que l'idée de symétrie soit ancrée au plus profond de l'esprit humain — il n'est pas d'art qui n'en fit usage —, elle fut longue à s'imposer en science, hormis quelques fulgurantes apparitions chez Platon et chez Kepler. C'est la cristallographie qui donna droit de cité à la symétrie, en fondant sur elle sa classification des formes. Or Curie était issu de la brillante école française de cristallographie. En 1880, il avait alors 21 ans, il découvrit, avec son frère aîné Jacques, la piézoélectricité, c'est-à-dire l'apparition de charges électriques sur certains cristaux comprimés dans une direction conve-

nablement choisie. Inversement une tension électrique dilate ou contracte un tel cristal. Les cristaux piézoélectriques, dont le plus utilisé est le quartz, doivent avoir un axe de symétrie avec des extrémités différentes, comme un crayon taillé. On tire profit de ces phénomènes dans de nombreux appareils de physique dont certains furent inventés par Pierre Curie lui-même et qui servirent lors de sa découverte du radium avec Marie Curie. Aujourd'hui on utilise cette propriété dans les montres et les briquets à quartz, dont les cristaux sont produits artificiellement.

La découverte de la piézoélectricité ne fut pas fortuite. Dans sa préface aux *Œuvres de Pierre Curie*, Marie Curie rapporte que, dès 1880, les deux frères étaient déjà convaincus que la symétrie est un guide pour la recherche de nouveaux phénomènes. C'était un premier pas, encore limité à la cristallographie, vers l'idée générale que Pierre Curie allait développer pour toute la physique. Auparavant la symétrie jouait essentiellement un rôle descriptif, hormis quelques exceptions : ainsi, elle joua un rôle actif chez Pasteur quand il découvrit la chiralité de la matière vivante (deux objets chiraux sont symétriques par rapport à un miroir, telles une main gauche et une main droite) ; elle intervenait aussi pour étayer des affirmations *a priori* par exemple, l'égle probabilité des faces

d'un dé ; en mécanique, Newton avait compris le rôle de la symétrie en montrant que l'une des lois du mouvement planétaire de Kepler (la loi des aires) découle simplement de ce que la gravitation est une force centrale, à symétrie sphérique. Toutefois, cette remarque ne donna pas naissance à une méthode, car, pour faire de la symétrie un instrument d'investigation, il fallait en connaître les lois mathématiques, dont la découverte fut tardive. Elle ne date que du siècle dernier : c'est la théorie des groupes.

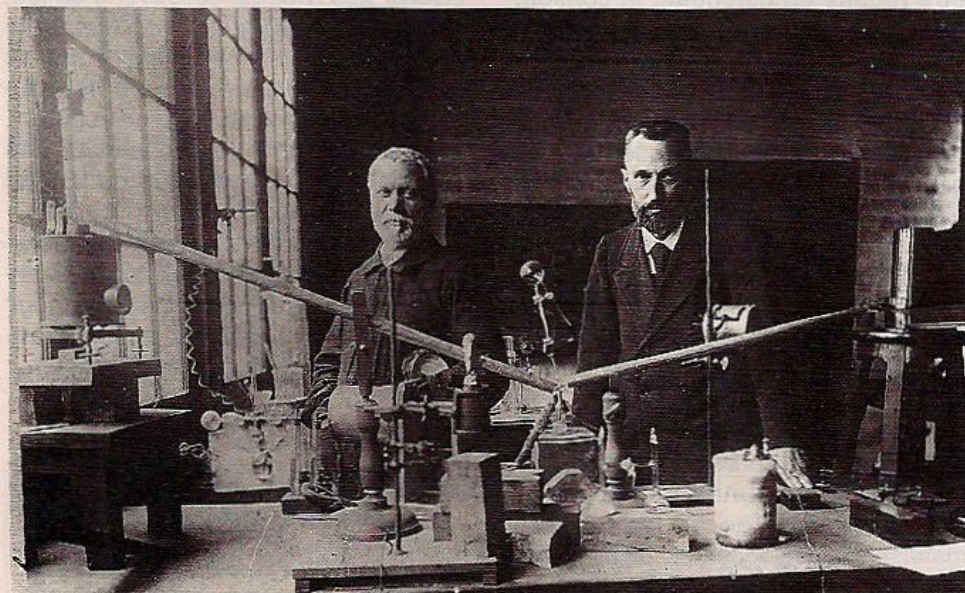
La théorie des groupes, c'est la symétrie en acte. Au lieu de constater la symétrie de façon statique, comme un état de fait établi, on définit des transformations qui échangent entre eux des objets homologues et réalisent une symétrie. Ce sont ces transformations qui sont les objets mathématiques étudiés par la théorie. En cristallographie, ces transformations sont des rotations selon des angles qui dépendent de la forme du cristal, des translations dont le pas est défini par le réseau atomique, et des symétries dans un miroir, toutes transformations qui laissent le cristal inchangé. C'est en cristallographie que la théorie des groupes révéla son pouvoir en physique : elle permettait la classification des cristaux et la prévision des formes fondamentales.

## SYMÉTRIE ET PRÉVISION

Pierre Curie franchit une étape décisive, dans son article publié au *Journal de physique*, en 1894, en proposant aux physiciens d'utiliser la symétrie des phénomènes pour contrôler la plausibilité de leurs déductions théoriques, faisant ainsi de la symétrie un moyen de prévision de phénomènes nouveaux.

Il commence par y définir sept classes, divisées en 19 familles, de groupes de transformations qui peuvent laisser invariant un phénomène physique. Ces groupes de Curie ne décrivent plus des cristaux dotés d'un réseau atomique périodique, mais seulement des objets limités dans l'espace. Parmi les groupes de transformations géométriques qui conservent la forme d'un tel objet, seules sont considérées les rotations, y compris autour d'un axe de révolution, tel celui d'un cylindre, et les symétries par rapport à un miroir. Curie introduit aussi d'autres types de symétries, par exemple celle du cylindre tordu, du tronc de cône ou du cylindre tournant, car il veut les appliquer à l'électricité et au magnétisme, comme en témoigne le titre de son article.

Une fois la nomenclature établie, il déclare que trop de symétrie nuit, et donne cette définition : «La symétrie caractéristique d'un phénomène est la symétrie maximale compatible avec l'existence du



1. Pierre Curie et son collègue André-Louis Debierne, dans le laboratoire de l'École de physique et chimie, en 1896.

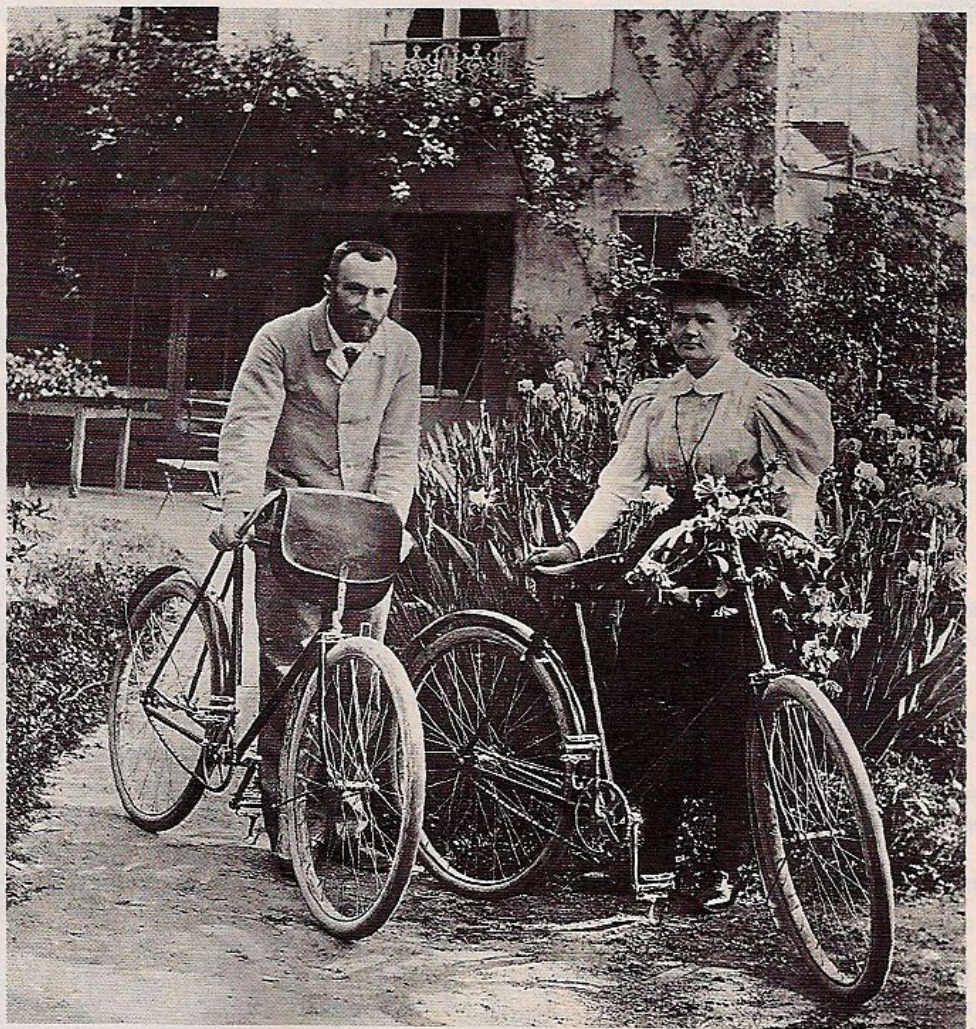
phénomène.» Il ajoute un peu plus loin : «Certains éléments de symétrie peuvent coexister avec certains phénomènes, mais ils ne sont pas nécessaires ; ce qui est nécessaire, c'est que certains éléments de symétrie n'existent pas. C'est la dissymétrie qui crée le phénomène.»

Curie va jusqu'à dire qu'il lui paraîtrait logique de faire la nomenclature des dissymétries plutôt que celle des symétries si des raisons de commodité ne l'en empêchaient. Il observe que, si plusieurs phénomènes se superposent, leurs dissymétries s'ajoutent, et il ne reste comme éléments de symétrie que ceux qui leur sont communs. Et il énonce un principe resté célèbre, principal enseignement que les physiciens tirent de son travail : «Lorsque certaines causes produisent certains effets, les éléments de symétrie des causes doivent se retrouver dans les effets produits.» Ou inversement : «Lorsque certains effets révèlent une certaine dissymétrie, cette dissymétrie doit se retrouver dans les causes qui lui ont donné naissance.»

La seconde assertion, conséquence logique de la première, explique pourquoi une trop grande symétrie de la cause peut empêcher un phénomène et, inversement, elle signifie qu'un effet peut être plus symétrique que la cause qui l'engendre. En revanche, certaines causes de dissymétrie n'agissent pas toujours sur les phénomènes, ou exercent parfois une action trop faible pour être observables : les lois de symétrie (ou plutôt de dissymétrie) fournissent des conditions nécessaires, auxquelles doivent satisfaire les causes pour que les phénomènes soient possibles, mais elles ne sont pas suffisantes pour qu'ils se produisent à coup sûr.

Donnons deux exemples : les frères Curie ont prévu la piézoélectricité en remarquant que, si les deux extrémités d'un axe de symétrie sont identiques, il n'y a aucune raison pour que les charges électriques positives s'accumulent à une extrémité et les charges négatives à l'autre ; au contraire, quand les deux extrémités sont différentes, on peut concevoir que les charges positives s'accumulent à un bout et les négatives à l'autre. L'expérience leur a donné raison. Un raisonnement semblable a conduit Pierre Curie à prévoir l'existence de monopôles magnétiques, c'est-à-dire de pôles magnétiques Nord et Sud isolés..., mais on ne les a jamais observés ; cela prouve, soit qu'ils n'existent pas, soit qu'on n'a pas encore trouvé le moyen de les observer.

La suite de l'article de Pierre Curie est consacrée à établir, grâce à des raisonnements rigoureux portant sur des données expérimentales précises, les lois de



2. Pierre et Marie Curie en 1896.

symétrie du champ électromagnétique, domaine qu'il avait choisi pour illustrer ses principes. Or, il faut bien reconnaître que, malgré la force avec laquelle la mécanique quantique a attiré l'attention sur la symétrie, celle qui caractérise l'électricité et le magnétisme est ignorée de la plupart des traités. On persiste à représenter les champs électrique et magnétique par des vecteurs, le plus souvent sans dire qu'ils sont de natures différentes, ce que Pierre Curie regrettait déjà.

Illustrons cette différence par une image simple. Le champ électrique se comporte comme un homme normal : s'il se regarde dans un miroir, son image le regarde et, s'il est tourné de profil, son image est tournée dans le même sens. Au contraire, le champ magnétique se comporte à l'inverse : s'il se regarde dans un miroir, son image lui tourne le dos (comme celle d'un personnage du peintre Magritte) et, s'il est de profil, son image est tournée dans l'autre sens. Toutefois, un champ tout seul, électrique ou magnétique, n'a pas la notion de droite et de gauche : contrairement à un homme, il peut se superposer à son image dans un miroir. En revanche, quand on ajoute les deux champs, leur ensemble devient

droit ou gauche : il est chiral (son image ne lui est plus superposable). Pierre Curie est le premier à le comprendre et explique, par cette chiralité, certains effets physiques comme l'effet Wiedeman (un fil de fer parcouru par un courant se tord spontanément dans un champ magnétique) ou l'effet Hall (dans un champ magnétique, une tension électrique apparaît entre les bords d'un ruban métallique parcouru par un courant).

Ce serait une grave erreur de réduire l'article de Pierre Curie à une série d'analyses, car il s'agissait d'un revirement de la pensée : la symétrie passa du rang de simple conséquence des lois qui gouvernent les phénomènes à celui d'une grande loi de la physique, qui entre dans l'essence même des phénomènes et devient un instrument de découverte ; pourtant Curie reconnaissait lui-même que les raisonnements de symétrie ne sont certains que lorsqu'ils interdisent un phénomène, non quand ils l'autorisent.

Au cours des 30 années qui suivirent cet article prémonitoire, la méthode envahit la physique grâce aux deux grandes théories du siècle, la relativité et la mécanique quantique. Celles-ci sont dominées par des lois d'invariance par rapport à des transformations qui

obéissent à des lois de groupe : cela signifie que deux transformations du même type se combinent pour en donner une autre du même type également (par exemple, deux rotations se combinent pour donner une troisième rotation).

## L'ESSOR INTELLECTUEL DE LA SYMÉTRIE

Certaines de ces lois d'invariance correspondent à des propriétés physiques simples, comme la symétrie centrale de l'attraction d'un noyau atomique ou la symétrie axiale d'un champ magnétique. D'autres sont plus abstraites et engagent la structure même de la théorie : ainsi, une loi est en accord avec la relativité si elle est invariante par rapport aux rotations d'un espace à quatre dimensions (l'espace-temps relativiste). Ces lois d'invariance eurent plusieurs conséquences : une fois admis le cadre conceptuel de la relativité et des quanta, on allait pouvoir chercher des équations décrivant de nouveaux phénomènes, non pas en les construisant pièce par pièce à partir des problèmes physiques, mais en posant *a priori* des équations conformes aux lois d'invariance, que l'on soumettait après coup au jugement de l'expérience.

Cette méthode fut inaugurée par Pierre Curie, qui nous avait mis en garde : elle n'est pas sûre. Et certes, elle ne l'est pas. Toutefois, guidée par une analyse physique préalable, par le génie scientifique et... par un peu de chance, elle a remporté plusieurs victoires, telles l'onde de de Broglie, les équations de la relativité générale d'Einstein et l'équation de l'électron quantique relativiste de Dirac. Guidée par de grands principes plutôt que par la recherche d'un phénomène particulier, elle offre des résultats inattendus. On a l'impression, comme le disait Hertz à propos des équations de l'électromagnétisme de Maxwell, que « ces formules mathématiques en savent plus que nous, plus même que ceux qui les ont écrites ».

La deuxième conséquence des lois d'invariance est liée à un théorème d'Emmy Noether, sans doute la mathématicienne la plus remarquable du début du XX<sup>e</sup> siècle ; selon ce théorème, les lois d'invariance impliquent des lois de conservation de certaines grandeurs physiques. Ainsi Newton avait montré que l'invariance par rotation entraîne la conservation des aires balayées par le rayon vecteur allant du Soleil à une planète (deuxième loi de Kepler) : c'est la conservation du moment cinétique. De même, l'invariance par translation d'espace entraîne la conservation de la quantité de mouvement, et l'invariance par translation du temps la conservation de l'énergie. Quant

à la conservation de l'électricité, elle est liée à une invariance par rapport à la phase d'une onde, ce que l'on nomme l'invariance de jauge.

Cela a deux autres conséquences : la première est que les lois d'invariance auxquelles obéissent les équations de la mécanique quantique fournissent les valeurs de certaines grandeurs physiques, vérifiables par l'expérience, sans même qu'il soit besoin de résoudre les équations en question et même, parfois, quand on ne sait pas les résoudre. La seconde conséquence est une méthode de construction de nouvelles équations dans la théorie des particules élémentaires : il s'agit des théories de jauge. L'invariance de jauge liée à la conservation de la charge électrique se généralise à son tour de deux façons : l'une permet de prévoir l'expression des champs de forces qui agissent sur la charge ; l'autre étend ces raisonnements à d'autres charges. Le résultat le plus remarquable obtenu dans ce sens est la théorie électrofaible de Steven Weinberg et d'Abdus Salam, qui a prévu l'existence de trois mésons lourds porteurs de l'interaction faible.

Telle est la nouvelle forme de physique annoncée par le mémoire de Pierre Curie. On ne saurait, malgré ces brillants résultats, oublier que les raisonnements de symétrie s'expriment dans un certain cadre théorique et que, si des faits nouveaux venaient à les bouleverser, les méthodes resteraient valides, mais il faudrait en réviser les bases. Qui plus est, la symétrie suppose des phénomènes établis avec une certaine permanence, et si la physique leur préférerait, un jour, l'étude des mécanismes évolutifs, donc transitoires, la symétrie perdrait son droit de cité. Son triomphe est le couronnement d'une certaine façon de voir le monde, qui, pas plus qu'une autre, n'est éternelle.

Ce triomphe, qui fut celui de ses idées, Pierre Curie ne l'a pas connu. Mort accidentellement en 1906, à l'aube de la science nouvelle, il n'a pas pris part à une évolution qu'il avait précédée. Il est certain qu'il s'y fût consacré passionnément puisque, nommé, peu avant sa mort, professeur à la Sorbonne, c'est la symétrie qu'il avait choisie comme sujet de son cours, qu'il ne fit jamais. C'est ce qui explique que son nom reste absent du maelström de la physique moderne, où la symétrie est entrée autrement, avec d'autres hommes.

Georges LOCHAK  
Directeur de la Fondation Louis de Broglie

Georges LOCHAK, *La géométrisation de la physique*, Flammarion, 1994.