MICHEL LAGUËS et DOMINIQUE GONIN-PEYSSON

*L'eureka de Pierre et Marie Curie sur les lieux-
mêmes de leurs découvertes*

**L'espace Pierre-Gilles de Gennes, un
espace ouvert au dialogue art-sciences**

L'espace des sciences accueille avec plaisir ce dialogue entre art et sciences initié par le *colloque Eureka, le moment de l'invention*. Une rencontre entre artistes et scientifiques dont les objectifs répondent pleinement à notre volonté de promouvoir l'innovation et réduire la distance culturelle entre le monde de la science et la cité.

Inauguré le 14 octobre 2004, l'Espace des Sciences de Paris a été imaginé par Pierre-Gilles de Gennes qui vient de nous quitter à l'âge de 74 ans. Ce lieu porte maintenant son nom, Espace Pierre-Gilles de Gennes en mémoire de ce physicien hors-normes, à la fois homme d'idées et de convictions.

L'action de Paul Langevin, directeur de l'ESPCI de 1925 à 1946, montre que la tradition de ne pas séparer la science de la cité a toujours animé cette grande école. L'action de l'Espace Pierre-Gilles de Gennes s'organise autour de trois pôles visant tous une meilleure diffusion des savoirs. Le pôle des expositions d'abord, dans une structure dont les tables de manip invitent un public même très jeune à participer à des expériences interactives sur notre environnement quotidien. Des expériences célèbres y sont également reconstituées et des expositions illustrent les œuvres de grands scientifiques comme Pierre Curie et Paul Langevin, ainsi que des applications industrielles de leurs recherches. Des expériences interactives sur les préoccupations actuelles des chercheurs des laboratoires de l'ESPCI sont en train de se mettre en place.

Un deuxième pôle propose une dizaine de conférences expérimentales par an, centrées autour d'expériences effectuées réellement devant le public et illustrant les acquis scientifiques récents. Le troisième pôle enfin s'oriente vers la rénovation de l'enseignement des sciences à l'école et au collège. *Sciences à l'école* s'inscrit dans la dynamique de *La Main à la pâte* et recherche de nouveaux itinéraires pédagogiques tout en restant adossé à un travail de terrain avec les élèves et les enseignants. Une action où accompagnateurs et enseignants co-élaborent des séances de sciences, pour aller de l'initiation à la démarche d'investigation jusqu'à la culture scientifique et l'éducation à la citoyenneté.

De Pierre Curie à Pierre-Gilles de Gennes, des moments de l'invention de la matière

*Le cheminement scientifique de Pierre Curie, chercheur précoce et fécond (1859-1906)*¹³⁷

Une formation atypique

L'enfance de Pierre Curie est marquée par une éducation très particulière, en dehors du circuit de la scolarisation et en relation très proche avec la nature. Une sorte d'école buissonnière. Ses recherches en porteront la marque par la suite. Elles se caractérisent par la mise en place de dispositifs expérimentaux particulièrement originaux et maîtrisés. Il les a utilisés pour une investigation de la matière par la voie expérimentale, découvrant par là des propriétés très variées et souvent fort abstraites. Il s'intéresse ainsi successivement à la piézoélectricité, à la symétrie, au magnétisme puis enfin à la radioactivité.

¹³⁷ Loïc Barbo, Denis Beaudouin, Michel Laguës, *L'expérience retrouvée*, Belin, Paris, 2005

Eureka ! Le moment de l'invention

Une approche de la recherche en physique qu'il gardera toujours: observation, mesure rigoureuses, théorisation. La piézoélectricité.

Il commence à étudier très jeune –il a tout juste vingt ans– les propriétés électriques des cristaux, à l'initiative d'un parent éloigné minéralogiste et chimiste, Charles Friedel. En compagnie de son frère Jacques, plus âgé de quatre ans, ils précisent et délimitent le phénomène de la pyroélectricité: dégagement d'électricité (polarisation) d'un cristal sous l'effet de la température. Ils découvrent ensuite une nouvelle propriété, la piézoélectricité: polarisation d'un cristal sous l'effet d'une pression mécanique. Entre 1880 et 1882, ils établissent les lois de ce phénomène par une série de mesures habiles, puis en établissent les mécanismes physiques.

Les applications de la piézoélectricité sont maintenant particulièrement nombreuses et très présentes dans notre quotidien. La production d'ultra-sons a permis à Paul Langevin d'inventer le sonar, application la plus connue de la piézoélectricité. Mais tous nos microphones ont été développés à partir des électrets, dérivés de cette propriété. Les allumeurs des cuisinières à gaz et des briquets, l'horlogerie et leur système à quartz particulièrement régulier, les capteurs utilisés dans nombre de machines (usinage des métaux, automobiles, océanographie, sismographie). La piézoélectricité est très utile actuellement dans la haute technologie, comme pour le microscope à pointe qui bénéficie ainsi d'une capacité de contrôle sur le déplacement de l'aiguille à l'échelle d'un atome, ou encore dans l'imagerie médicale.

Partir du questionnement pour bâtir une théorie

Pierre Curie part d'une interrogation formulée à l'égard du quartz pour bifurquer vers d'autres questionnements. Pourquoi ce matériau qui présente des propriétés piézoélectriques n'est-il pas pyroélectrique? Les propriétés de symétrie qu'il aborde pour y répondre le conduisent à se plonger dans un long travail de réflexion

théorique en solitaire pendant près de dix ans. Il publie finalement en 1894 *Sur la symétrie des phénomènes physiques*, œuvre majeure dont Pierre-Gilles de Gennes dira plus tard qu'elle « est l'une des contributions scientifiques les plus profondes du XIX^{ème} siècle ». Elle analyse la notion selon laquelle « lorsque certaines causes produisent certains effets, les éléments de la symétrie des causes doivent se retrouver dans les effets produits. Lorsque certains effets révèlent une certaine dissymétrie, cette dissymétrie doit se retrouver dans les causes qui lui ont donné naissance ». Le traité est à la fois théorique et didactique, il aborde un champ large de la physique à la géométrie en passant par la cristallographie. Les termes sont d'une grande clarté, bénéficiant du recul de Curie sur les phénomènes et de sa vision géométrique intérieure des phénomènes et de la matière.

Saisir le hasard, ou comment Pierre Curie change de champ d'investigation

En 1894, Pierre Curie a trente-cinq ans et n'est toujours que préparateur ou chef des travaux à l'école de Physique et Chimie Industrielle de la ville de Paris. Son frère Jacques ayant décidé de soutenir une thèse sur le champ électrique, il choisit (par symétrie ...) d'étudier le champ magnétique! Alors qu'il aborde tout d'abord le problème sous un angle théorique, son talent et son goût pour l'expérience et la mesure rigoureuse le conduisent avec succès à effectuer les toutes premières mesures quantitatives sur l'aimantation en fonction de la température. Sa thèse va poser les fondements du magnétisme moderne : il est peu fréquent de trouver dans un tel document autant de résultats novateurs et à l'origine d'autant de recherches ultérieures qui prolongeront lois et interprétations.

Selon les lois physiques établies au 19^{ème} siècle, l'aimantation serait une conséquence du passage de courants électriques. L'existence de matériaux aimantés de manière permanente est donc un mystère. Pierre Curie étudie et classe en 1895 les propriétés de la matière et les lois qui régissent l'aimantation, notamment lorsque la température varie.

Eureka ! Le moment de l'invention

Il distingue alors trois familles de matériaux: ferromagnétiques, paramagnétiques et diamagnétiques. C'est Paul Langevin qui fournira l'interprétation microscopique des analyse de Curie: de micro-aimants portés par les électrons (les spins) peuvent s'attirer et s'aligner les uns par rapport aux autres pour produire une aimantation permanente. Lorsqu'on chauffe le matériau, l'agitation thermique désoriente les spins et l'aimantation disparaît au-delà d'une température critique : la température de Curie. Le matériau est alors paramagnétique, c'est-à-dire que les spins sont orientés au hasard, mais ils peuvent s'aligner si on approche un aimant. Par ailleurs, tous les matériaux sont aussi diamagnétiques: ils présentent une aimantation très faible de direction opposée à celle de l'aimant et indépendante de la température.

Où la découverte naît dans l'inventivité, l'habileté et la rigueur expérimentale

Pierre Curie conçoit une expérience qui lui permet de mesurer l'aimantation, même extrêmement faible, d'un corps placé à l'intérieur d'un four. Le four est lui-même situé dans l'entrefer d'un électro-aimant dont on contrôle le champ magnétique et sa répartition spatiale. La matière étudiée possède une aimantation qui dépend de sa nature, du champ magnétique produit par l'électroaimant et la température du four. Il se crée une force proportionnelle à la capacité du matériau à s'aimanter et l'échantillon se déplace très légèrement par rotation autour du fil de suspension. L'amplitude de cette rotation donne une mesure de l'aimantation. Le dispositif permet de détecter des déplacements de l'ordre du micron !

Le travail de recherche a pour objectif l'observation et l'analyse des transitions entre les trois états magnétiques. Des expériences ont été réalisées de manière détaillée sur une vingtaine de corps, depuis la température ambiante jusqu'à 1400°C et pour plusieurs champs magnétiques. Très attaché à la précision et à la propreté des mesures, Curie apporte un soin extrême aux conditions expérimentales afin d'éliminer les causes extérieures de

perturbation.

C'est en multipliant les précautions expérimentales qu'il observe, en vérifiant le zéro de son équipement de mesure, que l'oxygène de l'air ambiant donne un signal: il vient de découvrir le paramagnétisme de l'oxygène! Il multiplie alors les mesures sur un échantillon test afin d'apporter toutes les corrections de mesure nécessaires en fonction de la température, et établit du même coup la loi de Curie, qui reste aujourd'hui la description de base du paramagnétisme en raison inverse de la température, l'équivalent de la loi de Boyle Mariotte pour les gaz parfaits! Et tout ceci comme aboutissement logique d'une exigence de précision expérimentale ...

Etablir des analogies: construire un pont vers de nouvelles manières de penser la matière

En écrivant les lois du magnétisme de la matière, Pierre Curie ouvre la voie aux descriptions microscopiques et plus généralement à la théorie des changements d'états. Celle-ci rejoint paradoxalement l'étude des conditions de « brisure de symétrie » où le principe de Curie se trouve violé. Il écrit dans sa thèse que « la loi de variation de l'aimantation dans le voisinage de la température de transformation magnétique est entièrement analogue à la façon dont varie la densité d'un fluide dans le voisinage de la température critique ».

Il établit ainsi un parallèle entre l'évolution de l'aimantation du fer et l'évolution de la densité d'un fluide en fonction de la température, lorsqu'on se place aux conditions de pression critique du fluide. Il compare la forme des courbes dans les deux diagrammes de phase: Ferromagnétique/paramagnétique, où l'aimantation $M = f(T)$ à plusieurs champs H constants, et cristal/liquide/vapeur, où la densité $D = f(T)$ à plusieurs pressions constantes. Elles permettent d'illustrer leur analogie au point critique. Cette universalité rendra perplexe bien des physiciens durant tout un siècle. De Gennes fera parti des théoriciens qui proposeront dans les années soixante-dix les explications et les

Eureka ! Le moment de l'invention

extensions les plus lumineuses.

Faire se rencontrer les chemins de pensée pour aller plus loin

C'est à la fin de sa thèse que Pierre Curie épouse Marie, qu'il a rencontrée quelques années auparavant. Chacun connaît l'aventure de la radioactivité qui s'ensuivit... Nouvelle réorientation scientifique de Pierre Curie qui rejoint les thématiques de sa femme. Il reste cependant focalisé sur l'étude des propriétés de la matière, la radioactivité cette fois, s'appuyant là encore sur un appareillage expérimental original, performant et précis utilisant un électromètre à quadrants et un générateur de charges étalonnées à quartz piézoélectrique. La découverte de nouveaux radio-éléments, l'étude de la radioactivité - terme qu'ils proposent pour la première fois- la découverte de l'énergie nucléaire les conduisent au prix Nobel de physique en 1903.

Sur les traces de Pierre Curie, Pierre Gilles de Gennes, adepte infatigable de la transversalité (1932-2007)

Dans son discours à l'occasion du transfert des cendres de Pierre et Marie Curie au Panthéon, Pierre Gilles de Gennes nous fait partager les raisons pour lesquelles il a embrassé une carrière scientifique: « La découverte de la piézoélectricité par Pierre et Jacques Curie a eu des conséquences incroyablement importantes sur notre vie quotidienne et sur notre compréhension du monde ». Récompensé lui aussi par le prix Nobel de physique en 1991, Pierre-Gilles de Gennes aimait particulièrement plonger sans cesse dans de nouveaux domaines. Il en fut d'ailleurs la plupart du temps le pionnier, de la physique à la biologie en passant par la chimie. À la fois inventeur de théories et de nouveaux chemins, pour lui « le vrai point d'honneur n'est pas d'être toujours dans le vrai. Il est d'oser, de proposer des idées neuves et ensuite de les vérifier ».

À l'origine d'études remarquables sur les phénomènes d'ordre et de désordre dans les milieux complexes, ce qui lui

vaudra d'être nommé membre de l'académie des sciences en 79, il devient l'inventeur d'un nouveau champ d'investigation: « la matière molle ».

Le prix Nobel lui sera ensuite attribué pour ses recherches sur le magnétisme, la supraconductivité, les cristaux liquides, les polymères, les surfaces. Il continuera ensuite à travailler sur les matériaux divisés et la biologie.

Un regard personnel pour un scientifique visuel

Il aborde l'étude scientifique de la matière avec un regard très personnel. Scientifique qualifié de « visuel », il s'intéresse principalement aux objets visualisable, de taille macroscopique. Il renouvelle l'approche des milieux continus et Jacques Friedel dira au sujet de ses travaux: c'est bien la tradition qu'il a remise à l'honneur, des approches mésoscopiques, où le milieu condensé est le plus souvent traité de façon continue, avec quelques paramètres tirés si possible de l'expérience. C'est cette approche que l'on trouve prioritairement dans les domaines successifs qu'il a abordés avec tant de succès. [...] Une telle approche nécessite un contact journalier avec l'expérience faite ou à faire ».

Sur les chemins de leurs créativité

Pierre Gilles de Gennes et Pierre Curie se rejoignent sur bien des points. Outre leur passion commune pour les approches qui ont un caractère d'universalité – par exemple la symétrie pour Pierre Curie, et l'ordre pour Pierre-Gilles de Gennes –, ils partagent une manière d'aborder la physique de la matière sur la base de l'expérience. Les parcours féconds de ces deux immenses physiciens et leurs manières d'être chercheurs nous permettent de relever certaines caractéristiques de créateurs qui leur sont propres.

Eureka ! Le moment de l'invention

Un recul par aux phénomènes physique

C'est ce recul qui conduit Pierre Curie à créer sans cesse des liens entre l'approche expérimentale et la théorie.

Pour lui, la théorie est une représentation du réel mais également une interprétation. Elle a pour but de réunir des résultats expérimentaux dans un cadre général. Ses dispositifs expérimentaux sont d'une grande originalité et réalisés avec une quantité « d'astuces » étonnante. Au cours de ses recherches expérimentales, il propose des interprétations faisant appel aux théories moléculaires.

La volonté de transmettre au mieux ses découvertes

Il n'hésite pas pour cela à écrire son rapport sur la symétrie sous une forme élégante et originale, d'une grande clarté. En tant qu'enseignant, activité qui le passionne, il développe des idées très personnelles, originales et modernes pour son époque, sur la physique mais aussi sur l'enseignement en général.

L'innovation selon Pierre-Gilles de Gennes

Pour Pierre-Gilles de Gennes l'innovation est une aptitude qui se cultive, comme (et avec) le sens de l'observation, et le sens d'une certaine habileté manuelle. Toutes ces choses-là surprennent. [...] Une certaine tendance au scepticisme peut être utile. [Il faut] travailler en groupe. On n'a pas besoin des gens qui couvrent un domaine immense. Nous vivons le travail en équipe, et chacun apporte sa pierre»¹³⁸.

¹³⁸ Interview de Pierre Gilles de Gennes pour la Revue des Centraliens.
<http://www.futura-sciences.com>

Des chercheurs qui nous ouvrent la voie

Pierre-Gilles de Gennes n'a pas fait que « découvrir ». Il a tout aussi bien inventé des expériences, des noms, des disciplines. Il a créé un nouveau regard sur la science, des analogies, des concepts nouveaux. Il a inauguré des façons de conter la science, de nouveaux itinéraires de pensée, des ponts vers des îles impensées. Comme par exemple ses dernières recherches sur la biophysique des processus neuronaux impliqués dans la mémoire. Une façon peut-être de nous indiquer que le fonctionnement du cerveau, dont le processus de l'insight et de l'Eurêka font partie, sera un des enjeux principaux des années à venir.