

LA SOCIÉTÉ FRANÇAISE DE PHYSIQUE ET LA PHYSIQUE D'AVANT-GARDE

(1890–1920)

Depuis sa fondation en 1873, la Société Française de Physique (SFP) n'a cessé de jouer un rôle majeur dans la vie de la physique française. Il est donc naturel de se demander dans quelle mesure elle a permis, favorisé, ou freiné le développement d'une nouvelle physique durant les trente années qui virent l'avènement de l'électron, des premiers concepts quantiques et de la théorie de la relativité. Pour que la question ait un sens précis, il faut d'abord définir le type de nouveauté qui nous intéresse. Des découvertes aujourd'hui presque oubliées, par exemple l'Invar de Charles-Édouard Guillaume en 1896 ou l'interféromètre de Charles Fabry et Alfred Pérot en 1899 enthousiasmèrent la SFP par la précision des mesures qu'elles promettaient. À la même époque, la SFP consacra de nombreux exposés aux ondes hertziennes, encore fraîches et bientôt appliquées à la télégraphie sans fil. Et elle rapporta des contributions importantes dans des domaines plus anciens de la physique, par exemple les lois de Pierre Curie touchant au magnétisme en 1893 ou les tourbillons cellulaires de Henri Bénard en 1900. La SFP avait raison de saluer ces progrès peu dérangeants ; et les historiens auraient tort de les négliger car leur impact sur l'évolution future de la physique fut considérable. Mais dans la présente étude nous porterons le regard sur un autre genre de découvertes : celles qui dérangèrent les habitudes des physiciens et entraînèrent un changement radical de la physique fondamentale. La question est de savoir dans quelle mesure la SFP a favorisé l'exposition, la diffusion, et la production de telles nouveautés en son pays.¹

¹ Guillaume 1897 ; Amédée 1898 (Fabry-Pérot) ; Pérot et Fabry 1904 ; P. Curie 1893 ; Bénard 1900a, 1900b.

La première section de cet article donne un aperçu de la nouvelle microphysique qui prit corps au tournant du siècle, à l'aube de la physique atomique, relativiste et quantique. La seconde section retrace les contributions françaises à cette nouvelle physique, telles qu'elles furent présentées et discutées dans les *Bulletins* de la SFP de 1895, date de la découverte des rayons X, à 1909, date des expériences de Jean Perrin sur mouvement brownien. La troisième section poursuit l'enquête dans le cadre du premier congrès international de physique, organisé par la SFP en 1900. Les quatrième et cinquième sections sont consacrées aux nouvelles théories quantiques et relativistes à travers les séances et conférences de la SFP. Enfin, la dernière section donne les conclusions de l'enquête.

Rappelons d'abord les origines et la vocation de la SFP. La Société Française de Physique fut créée en 1873 par un petit groupe de physiciens soucieux de réunir tous ceux et celles qui en France s'intéressaient à la physique, qu'ils soient à Paris ou en province, qu'ils soient académiciens, universitaires, professeurs de lycée, industriels, ingénieurs, militaires, médecins, constructeurs d'appareils ou techniciens de laboratoire. Tous les sujets d'actualité y étaient abordés, qu'ils aient ou non reçu le sceau des autorités académiques. Elle encourageait la communication avec les scientifiques étrangers et elle invitait les meilleurs d'entre eux à devenir membres associés. Cet esprit d'ouverture peut être illustré par une remarque de Jules Joubert lors de la traditionnelle allocution du président sortant, le 15 janvier 1895 :²

Je cite en dernier lieu la communication que M. Guillaume a bien voulu nous faire sur les expériences de M. Lenard [sur les rayons cathodiques] parce que j'y vois un exemple que je voudrais voir suivre plus souvent. Nous ne sommes pas une Académie devant laquelle on ne peut se permettre d'apporter que les résultats de recherches personnelles et originales ; nous sommes une réunion de collègues et de camarades, également dévoués à la Science et qui ne demandons qu'à nous instruire et nous éclairer mutuellement. Si l'un de nous a étudié à fond un travail nouveau et important publié à l'étranger, n'est-il pas dans l'intérêt de tous qu'il en fasse part à ses collègues ?

² Joubert 1895. Sur l'histoire générale de la SFP, voir M. Brillouin 1925 ; Martínez 2004 ; Bustamante, Martínez et Shinn 2005.

Les activités de la SFP comprenaient une réunion bimensuelle dans les locaux de la Société d'encouragement pour l'industrie nationale (au 44, rue de Rennes), l'exposition de Pâques consacrée aux instruments scientifiques, des conférences présentant les avancées les plus récentes de la physique, et l'organisation, en 1900, du premier congrès international de physique. La Société avait une activité éditoriale importante : outre les volumineux rapports du congrès de 1900, elle publia des collections de "mémoires relatifs à la physique" couvrant les travaux historiques fondateurs ainsi que les découvertes les plus récentes dans une série de domaines. Elle distribuait périodiquement un bulletin contenant ses procès-verbaux, des résumés de toutes les communications et, de 1897 à 1910, les textes complets des plus importantes d'entre elles. Enfin la Société entretenait des liens étroits avec le *Journal de physique théorique et appliquée*, qui publiait une partie des mémoires de la SFP et proposait des résumés de travaux étrangers.³

La SFP eut le succès escompté par ses fondateurs. Le nombre de ses membres, originellement en dessous de la centaine, fut multiplié par dix dans les trente premières années. Elle fut présidée par les plus grands noms de la physique française, et elle resta ouverte à un public très divers, à rebours de l'élitisme des principales institutions académiques. Ses réunions bimensuelles autorisaient des communications sur les sujets les plus divers et elles étaient souvent suivies de discussions, dans un esprit constructif et amical. Cette brève présentation de la SFP devrait suffire à faire comprendre son attitude face à la nouvelle physique qui apparut au tournant du siècle.

1. La physique d'avant-garde

³ Le fondateur du *Journal de physique*, Charles-Joseph d'Almeida, était aussi cofondateur de la SFP.

Au début des années 1890, la physique semblait avoir atteint une grande maturité. On observait un peu partout la richesse de ses applications, dans les usines, sur les chemins de fer ou sous l'éclairage électrique. Elle s'appuyait sur des techniques expérimentales toujours plus raffinées, et elle permettait de comprendre un grand nombre de phénomènes dans quelques cadres théoriques bien construits. Le plus ancien de ces cadres, la mécanique newtonienne, embrassait les corps célestes, les fluides, les corps élastiques, les machines simples — et bien plus. La plupart des physiciens continuaient d'y voir le fondement de leur science ou tout au moins exigeaient la validité de principes généraux d'origine mécanique, comme la conservation de l'énergie ou le principe de moindre d'action. La thermodynamique, née au milieu du siècle des efforts de Sadi Carnot, William Thomson et Rudolf Clausius, régnait dans le domaine des machines thermiques et dans la théorie des équilibres physico-chimiques. L'optique élaborée par Augustin Fresnel avait apporté un certain nombre de lois pérennes pour la propagation de la lumière en tant que vibration transverse d'un milieu éthéré, et elle offrait des moyens de mesure étonnamment précis. Les physiciens d'ici et d'ailleurs s'accordaient sur quelques grandes lois de l'électrodynamique, lesquelles avaient permis des développements électrotechniques spectaculaires. Certes, les Britanniques et les Continentaux s'étaient longtemps opposés quant à la nature profonde des interactions électromagnétiques, mais les récentes expériences de Heinrich Hertz sur les ondes émises par un oscillateur électrique venaient de trancher, en 1887–88, en faveur de la théorie des champs établie par James Clerk Maxwell et ses successeurs.⁴

Au début des années 1890, les fondements de ce bel édifice de la physique du XIX^e pouvaient paraître inébranlables. Quelques tensions apparurent cependant quand on chercha à faire communiquer les principaux secteurs de cet édifice : la mécanique, la thermodynamique,

⁴ Pour une vue générale de la physique du XIX^e, cf. Harman 1982.

l'optique, et l'électrodynamique. Dans leurs tentatives de fonder la thermodynamique sur une image mécanique et moléculaire de la matière, Maxwell et Ludwig Boltzmann avaient réduit le second principe de la thermodynamique à un énoncé purement statistique, lié au nombre immense des molécules d'un corps macroscopique. La manière subtile dont Boltzmann conciliait la réversibilité des phénomènes mécaniques et l'irréversibilité des phénomènes macroscopiques ne convainquit presque personne. Les quelques succès de la théorie cinétique des gaz dans l'explication des phénomènes de transport et dans la détermination convergente du nombre d'Avogadro pouvaient sembler maigres en comparaison des succès innombrables de la thermodynamique. Pour beaucoup de physiciens allemands et français, les théories moléculaires devaient céder le pas aux théories dites phénoménologiques. Même si la plupart d'entre eux continuaient de croire en une structure moléculaire de la matière, certains osaient rejeter toute forme d'atomisme et préféraient se fier aux principes de la thermodynamique macroscopique. L'unification de la mécanique et de la thermodynamique dans une image cinétique moléculaire restait donc un problème ouvert.⁵

Considérons maintenant l'unification de la mécanique et l'optique. Nombreuses avaient été les tentatives d'interpréter les ondes de Fresnel comme des vibrations d'un éther mécanique, et aucune n'avait pu s'imposer. La théorie électromagnétique de la lumière, proposée dès 1865 par Maxwell puis développée par ses disciples, semblait échapper aux difficultés de l'éther élastique et elle permettait une unification spectaculaire de l'optique et de l'électrodynamique. Certes, il était aussi difficile d'imaginer un modèle mécanique convaincant pour l'éther électromagnétique que pour l'éther élastique. Mais Maxwell et ses successeurs avaient su donner

⁵ Cf. Nye 1972 ; Principe 2008 ; Darrigol 2018.

une belle forme lagrangienne ou hamiltonienne à la théorie électromagnétique, montrant ainsi une affinité structurelle profonde de cette théorie avec la mécanique.⁶

A première vue, l'unification de l'optique et de l'électrodynamique semblait le succès le plus spectaculaire de la théorie de Maxwell. A y regarder de plus près, on constatait que sous sa forme originale cette théorie ne permettait pas de rendre compte des phénomènes optiques impliquant la dispersion de la lumière ou le mouvement des corps matériels. Elle avait aussi du mal à expliquer les diverses formes de magnétisme ou la conduction électrique dans les solutions salines et dans les gaz raréfiés. Comme nous pouvons en juger rétrospectivement, cet échec venait de la manière purement macroscopique dont Maxwell abordait le rapport entre éther et matière. Il admettait un seul milieu continu éther-matière décrit par quatre paramètres phénoménologiques de permittivité, perméabilité, conductivité, et vitesse (par rapport à l'espace absolu) ; alors que les phénomènes susmentionnés ne peuvent s'expliquer sans faire intervenir la structure moléculaire de la matière. Dans les années 1890, Hendrik Lorentz puis Joseph Larmor et Emil Wiechert montrèrent que la plupart des difficultés s'évanouissaient si l'on admettait une matière constituée de molécules, ions et électrons tous libres de se mouvoir dans un éther rigoureusement immobile, et si l'interaction entre éther et matière se résumait à un effet réciproque du champ électromagnétique et du mouvement des ions et des électrons. La puissance extraordinaire de cette théorie à expliquer la quasi-totalité des phénomènes optiques et électrodynamiques renforça considérablement la conception moléculaire de la matière. A la fin du siècle, les succès de Lorentz étaient communément reconnus, même par ceux qui continuaient de préférer une approche phénoménologique de la physique.⁷

⁶ Cf. Whittaker 1910; Buchwald 1989; Darrigol 2000, 2012.

⁷ Cf. Buchwald 1985 ; Darrigol 2000.

La théorie de Lorentz n'était néanmoins pas exempte de difficultés. En particulier, elle ne rendait pas compte de l'absence constatée d'effets du mouvement de la terre sur l'optique et l'électrodynamique terrestres que par une voie assez directe et artificielle. Comme on le sait, Henri Poincaré puis Albert Einstein postulèrent une invariance exacte des phénomènes électrodynamiques lors du passage d'un référentiel inertiel à un autre, et ils associèrent cette invariance à une symétrie formelle fondamentale du système d'équations de Maxwell-Lorentz. Einstein et Hermann Minkowski redéfinirent les concepts fondamentaux d'espace et de temps à partir de cette symétrie. Ainsi naquit la théorie de la relativité restreinte en 1905–1908. Dix ans plus tard, après de longs tâtonnements, Einstein parvint à la théorie de la relativité générale en faisant de l'espace-temps une variété différentielle de métrique localement Minkowskienne, en associant la courbure de cette variété à la présence de matière, et en assimilant le mouvement gravitationnel d'une masse ponctuelle à une géodésique de cette variété. Il obtint ainsi l'avance relativiste du périhélie des planètes, la déviation gravitationnelle des rayons lumineux, et le décalage vers le rouge des raies spectrales émises dans un champ fort de gravitation.⁸

Un dernier cas d'unification problématique concerne la thermodynamique, la mécanique statistique, et l'électrodynamique (ou l'optique). L'idée d'une telle unification se présenta naturellement à Gustav Kirchhoff au milieu du XIX^e siècle alors qu'il cherchait à comprendre les propriétés du rayonnement émis par un corps incandescent. Par un raisonnement thermodynamique, il établit un théorème dont il résulte que le rayonnement dans une cavité absorbante portée à une température bien définie — bientôt appelé rayonnement du *corps noir* — a une énergie continûment distribuée sur tout le spectre de fréquence, avec une densité spectrale universelle. Toujours dans un cadre thermodynamique, Boltzmann établit plus tard la loi de

⁸ Einstein 1905a. Cf. Miller 1981a; Darrigol 2000, 2021; Renn *et al.* 2007.

Stefan pour l'énergie totale du rayonnement du corps noir, et Wilhelm Wien établit la loi de déplacement (du spectre en fonction de la température) qui porte son nom. Vers la fin du siècle, Max Planck eut l'ambition plus élevée de déterminer complètement la densité spectrale du corps noir en examinant les interactions entre micro-résonateurs électriques et rayonnement à l'intérieur d'une cavité idéalement réfléchissante. Il n'y parvint qu'en admettant la relation de Boltzmann entre entropie et probabilité, et en calculant la probabilité d'une distribution d'énergie sur un ensemble de résonateurs de fréquence ν en faisant comme si cette distribution se faisait par quanta $h\nu$, h étant une nouvelle constante fondamentale ayant la dimension d'une action.⁹

Plus tard, en 1905, Einstein argua que l'électrodynamique ordinaire et la mécanique statistique de Boltzmann conduisaient nécessairement à une valeur infinie absurde de l'énergie du rayonnement du corps noir et, inversant la relation de Boltzmann entre entropie et probabilité, il montra que la probabilité des fluctuations du rayonnement du corps noir dans un petit volume était la même que si ce rayonnement était un gaz de quanta $h\nu$ pour la fréquence ν . Il en tira l'idée que les échanges d'énergie entre matière et rayonnement monochromatique ne pouvaient se faire que par quanta. Cette suggestion révolutionnaire ne fut guère suivie. Une autre proposition d'Einstein, celle d'expliquer les anomalies des chaleurs spécifiques des solides et des gaz par une quantification de l'énergie des molécules impliquées, fut mieux appréciée et elle suscita d'importants développements expérimentaux sous l'impulsion de Walther Nernst à Berlin. En 1908, Lorentz conclut comme Einstein qu'un nouvel élément de discontinuité était nécessaire pour rendre compte du rayonnement du corps noir. Trois ans plus tard, au Conseil Solvay de 1911, un consensus se dégagait en faveur d'une nouvelle discontinuité quantique, même si la nature profonde de cette continuité restait obscure.¹⁰

⁹ Cf. Kuhn 1978 ; Darrigol 1992, Part 1.

¹⁰ Einstein 1905a. Cf. Kuhn 1978.

En somme, les théories modernes de la physique atomique, relativiste et quantique ont leur origine dans quelques tentatives d'unification des quatre fleurons de la physique de la physique du XIX^e : la mécanique, la thermodynamique, l'optique, et l'électrodynamique. L'unification de la mécanique et la thermodynamique a conduit aux théories cinétiques moléculaires et à la mécanique statistique ; l'unification de l'optique et de l'électrodynamique a conduit à la relativité via la théorie de Lorentz ; l'unification de l'électrodynamique et de la thermodynamique au moyen de la mécanique statistique — elle-même issue d'une autre unification — a conduit à la théorie quantique. La théorie cinétique moléculaire et la mécanique statistique furent renforcées par leur emploi dans la théorie de Lorentz (étendue aux métaux) et dans la théorie quantique.¹¹

Ces tentatives d'unification n'étaient pas exclusivement théoriques : elles étaient en partie guidées par des résultats expérimentaux et elles ont suscité de nouvelles expériences. Et surtout, les innovations que je viens de rappeler sont étroitement liées à l'apparition d'un nouveau genre de physique expérimentale dont je n'ai retardé l'exposé que par souci de clarté. Les physiciens des années 1890 savaient que leurs aînés s'étaient longtemps efforcés de comprendre la nature du courant électrique dans les électrolytes et dans les gaz raréfiés. Là encore, certains préféraient une approche descriptive macroscopique, d'autres jugeaient nécessaires des hypothèses moléculaires et corpusculaires. Il n'y avait pas de consensus sur les propriétés ou même l'existence des entités moléculaires, et celles-ci semblaient hors de portée de toute observation. Sous l'autorité de Hermann Helmholtz, il était fréquemment admis que les lois de l'électrolyse ne pouvaient se comprendre sans faire l'hypothèse des ions, pensés comme fragments de molécules portant un ou plusieurs quanta de charge. Mais les ions et les quanta de charge semblaient à

¹¹ Jürgen Renn a souvent insisté sur les effets révolutionnaires des tensions inter-théoriques, par exemple dans Büttner, Renn, and Schemmel 2003.

jamais noyés dans le bain électrolytique. Dans les cinq dernières années du siècle, une cascade de découvertes vint changer la donne.¹²

En novembre 1895, Wilhelm Röntgen observa par hasard que les parois d'un tube cathodique émettaient un rayonnement susceptible de traverser des corps opaques et d'exciter la fluorescence des corps normalement utilisés pour détecter les rayons cathodiques. Il eut tôt fait d'employer ces "rayons X" pour photographier le squelette d'une main, et la découverte fit sensation. Comme les rayons X provenaient du lieu d'impact des rayons cathodiques sur les parois du tube et comme ce lieu était affecté d'une fluorescence verdâtre, Henri Becquerel se demanda si certains corps phosphorescents pouvaient aussi émettre des rayons X en l'absence de rayons cathodiques. À la fin février 1896, il annonça que tel était le cas pour les sels d'uranium. Il pensait alors que le rayonnement émis était de même nature que les rayons X et qu'il résultait de l'illumination antérieure du sel d'uranium (avec un retard considérable et avec une violation de la loi de Stokes). Ainsi commença l'étude de la radioactivité et des radiations qu'elle produit. Vers la fin de la même année, Pieter Zeeman découvrit l'effet d'un champ magnétique intense sur la ligne D du sodium, effet bientôt expliqué par Lorentz comme modification d'un courant particulaire intra-atomique. En même temps, Wiechert parvint à mesurer la vitesse des rayons cathodique ainsi que leur déviation magnétique, et en conclut que ces rayons étaient composés d'"atomes d'électricité" de masse environ 2000 fois plus petite que celle de l'ion hydrogène. Quelques mois plus tard, J. J. Thomson annonça la découverte de "corpuscules" de masse également faible en combinant les résultats d'expériences de déflexion magnétique et électrique des rayons cathodiques. Le concept moderne d'électron — ainsi nommé par Larmor — est un hybride de ces premières propositions. A la fin du siècle, il devint clair que les électrons

¹² Cf. Darrigol 2000, chap. 7.

apparaissaient dans de nombreuses circonstances : effet photo-électrique, effet thermo-ionique, radioactivité, diffusion des rayons X, etc.¹³

Cette cascade de découvertes permit l'élaboration d'une nouvelle microphysique expérimentale. Pour un nombre croissant de physiciens, les constituants ultimes de la matière semblaient enfin à portée de main. J. J. Thomson et d'autres imaginaient déjà des modèles de l'atome constitués d'électrons. Pour lui, pour Larmor, Lorentz et Drude, le courant électrique devenait une circulation d'électrons. Ces théoriciens combinèrent la théorie cinétique de Boltzmann et l'image d'un gaz d'électrons pour rendre compte de la conduction électrique et thermique dans les métaux. La nouvelle microphysique expérimentale vint ainsi préciser les objets de la microphysique théorique inaugurée par Boltzmann, Lorentz et Einstein. Avec la spectroscopie et la chimie, elle fournit le soubassement empirique de la théorie atomique de Bohr et Sommerfeld.

En résumé, les années 1890 virent la naissance d'une nouvelle expérimentation portant sur des objets définis à l'échelle atomique : ions, électrons, rayons X, rayons alpha, beta et gamma de la radioactivité, rayons canaux, etc. Ce type d'expérimentation continua de se développer au siècle suivant, avec de nombreuses applications pratiques par exemple avec les tubes électroniques ou la radiothérapie. Par ailleurs, en 1907–1908 Jean Perrin démontra que le mouvement brownien résultait de l'agitation moléculaire dans les fluides. Il devint difficile de nier l'existence des atomes et même celle d'entités subatomiques. Sur le plan théorique, la mécanique statistique de Boltzmann et Josiah Willard Gibbs s'imposa graduellement comme la voie royale dans l'étude des propriétés d'ensemble d'une quantité macroscopique d'atomes ou de

¹³ Röntgen 1895; H. Becquerel 1896a, 1896b, 1896c, 1896d ; Zeeman 1896, 1897a, 1897b; Wiechert 1897 ; J. J. Thomson 1897a, 1897b. Cf. Badash 1965a, 1965b, 1996 ; Martins 1997 ; Darrigol 1998 ; 2000, pp. 303–310, 346–347 ; 2014, pp. 798–799 ; Buchwald and Warwick 2001 ; Malley 2011.

molécules. Quelques éléments d'une nouvelle théorie quantique apparurent en réponse aux difficultés de la mécanique et de l'électrodynamique à rendre compte des interactions à l'échelle atomique. Enfin, la théorie de la relativité vint se substituer à la mécanique newtonienne et à l'électrodynamique de Maxwell dans l'étude des mouvements faisant intervenir des vitesses proches de celle de la lumière. Bien sûr, dans toute cette période (des années 1890 aux années 1920) la physique a continué de progresser de maintes autres façons à l'intérieur de paradigmes déjà établis. Mais il est rétrospectivement clair que les quatre innovations que je viens de rappeler définirent une "physique d'avant-garde" à cette époque. Voyons maintenant dans quelle mesure la SFP a contribué à ce nouvel élan.¹⁴

2. À la Société Française de Physique (1896–1909)

Il ne faut naturellement pas s'attendre à ce que la physique d'avant-garde occupât un volume considérable dans les publications de la SFP. En France comme ailleurs, on cherchait d'abord à perfectionner la physique existante en améliorant les instruments, en raffinant la connaissance des lois empiriques, et en consolidant la base métrologique. Un premier survol des Bulletins de la SFP montre l'importance considérable accordée à la présentation de nouveaux instruments et à la métrologie. Aux yeux des physiciens de l'époque, les innovations dans ce domaine participaient grandement au progrès de la science. En témoigne le prix Nobel attribué en 1920 au métrologue suisse Charles-Édouard Guillaume, très présent à la SFP, pour ces travaux sur les alliages de faible dilatabilité. On constate par ailleurs que la physique théorique était peu abordée

¹⁴Guillaume parlera de "physique d'avant-garde" à la SFP en 1914 ; voir plus bas, note 60.

à la SFP, sans doute parce que la tendance empiriste était alors plus prononcée en France qu'ailleurs, mais aussi parce que le public des séances de la SFP était trop large pour des exposés théoriques trop pointus. Les quelques membres de la SFP susceptibles de développer des théories profondes et nouvelles, par exemple Marcel Brillouin, Henri Poincaré ou Paul Langevin, réservaient leurs mémoires les plus savants au *Journal de physique* ou à d'autres revues spécialisées. En revanche, la SFP accueillait volontiers des exposés concernant les découvertes expérimentales les plus récentes.¹⁵

Rayons X et autres

Lors de la séance du 7 février 1896, le jeune Jean Perrin, alors agrégé préparateur à l'École Normale Supérieure, décrit les expériences qu'il a faites sur les rayons de "M. Röntgen" et montre les clichés X obtenus avec quelques normaliens. Il dit avoir vérifié la propagation rectiligne des rayons et ainsi exclu l'hypothèse d'une vibration électromagnétique de fréquence pas très supérieure à celle de la lumière ultra-violette. Camille Raveau, alors répétiteur à l'Institut national agronomique, fait remarquer que l'absence de réflexion et de réfraction sensible de ces rayons n'exclut pas qu'ils soient des vibrations électromagnétiques de très haute fréquence, car dans la théorie de la dispersion de Helmholtz l'indice optique de toute substance tend vers un pour les très grandes fréquences. Le physicien roumain Dragomir Hurmuzescu, alors en thèse à la Sorbonne sous la direction de Gabriel Lippmann, annonce sa découverte, en collaboration avec Louis Benoist, Professeur au Lycée Henri IV, d'un effet analogue à l'effet photo-électrique pour les nouveaux rayons et l'utilisation qu'ils ont faite de cet effet pour établir la loi du carré inverse de la distance. André Broca, Préparateur de physique à la Faculté de médecine et fils du

¹⁵ Sur la dominance de la physique expérimentale en France, cf. Pestre 1984.

célèbre Paul Broca, pense pouvoir affirmer que les rayons Röntgen ne diffèrent guère des rayons cathodiques, tels que Philipp Lenard a pu les observer en 1894 à l'extérieur d'un tube cathodique muni d'une mince fenêtre d'aluminium.¹⁶

Lors de la séance du 6 mars 1896, Henri Pellat, alors professeur adjoint à la Sorbonne, rapporte l'absence de déflexion des rayons Röntgen par un champ magnétique (selon le physicien Belge Eugène Lagrange). Un peu plus loin dans le Bulletin de cette séance, on peut lire l'annonce de la découverte de la radioactivité des sels d'uranium :

M. Henri Becquerel ... rend compte des premières expériences qu'il a exécutées sur l'émission de radiations invisibles par les sels d'uranium. Ces radiations impressionnent une plaque photographique au travers du papier noir, d'une plaque d'aluminium, ou d'une plaque de cuivre, et ont diverses propriétés communes avec les rayons X ... Un fait important est que les expériences précédentes réussissent également bien, non seulement quand les corps fluorescents sont exposés à la lumière du jour, mais encore quand ils sont maintenus à l'obscurité à l'abri de radiations excitant la fluorescence. Plus de trois jours après avoir été soustraits à toute action excitatrice, les corps ci-dessus mentionnés ont émis des radiations donnant des effets très énergiques.

L'ingénieur Hilaire de Chardonnet fait alors remarquer que si les rayons de Becquerel sont, tout comme les rayons X, une sorte de lumière ultra-ultra violette et si, comme Becquerel semble le penser, ils résultent d'une fluorescence retardée des sels d'uranium, alors la loi de Stokes se trouve violée.¹⁷

Lors de la séance du 20 mars, Hurmuzescu donne le détail de ses recherches avec Benoist concernant la décharge d'un électroscope par les rayons X. Il hésite entre un effet semblable à l'effet photo-électrique et un effet de conduction induite de l'air entre les feuilles de l'électroscope. Guillaume rapporte que selon J. J. Thomson, c'est cette seconde hypothèse, plus précisément l'ionisation de l'air par les rayons X, qu'il faut préférer car de l'air exposé aux rayons

¹⁶ Perrin 1896a ; Raveau 1896 ; Hurmuzescu 1896 ; Broca 1896a. Sur les recherches de Benoist, Hurmuzescu, Perrin, et Langevin concernant les effets électriques des rayons X, cf. Lelong 2005, pp. 95–106.

¹⁷ Pellat, *BSSFP* (1896), p. 85 ; H. Becquerel 1896c ; de Chardonnet, *BSSFP* (1896), p. 88.

et ensuite envoyé sur les feuilles d'or de l'électroscope est susceptible de le décharger alors même que les rayons n'atteignent pas ces feuilles. Becquerel poursuit l'exposé de ses recherches sur les radiations invisibles des sels d'urane, en insistant sur la persistance de ce rayonnement à une intensité presque constante même quinze jours après l'exposition des sels à la lumière. Par analogie entre dissipation de l'énergie et accroissement de la longueur d'onde par fluorescence, Guillaume suggère qu'une violation de loi de Stokes est acceptable si le rayonnement de Becquerel est accompagné d'un rayonnement plus intense de grande longueur d'onde. Guillaume fait remarquer qu'avant la découverte de Röntgen plusieurs manipulateurs de tubes cathodiques avaient observé sans le savoir des effets des rayons X produits par l'impact des rayons cathodiques. À son avis, Perrin a clairement démontré que ces derniers rayons portaient une charge électrique (en 1895), et le résultat contraire de Hertz s'explique par le fait que les rayons cathodiques ne constituent qu'une faible partie du courant dans le tube.¹⁸

Les rayons X sont aussi présents à l'exposition de Pâques 1896. Perrin, Benoist et Hurmuzescu y présentent leurs expériences. Le 8 avril, Perrin prononce une grand conférence intitulée "Rayons cathodiques, rayons X et radiations analogues." Il donne d'abord une brève histoire de la décharge électrique dans les gaz raréfiés. Il rappelle le conflit entre deux conceptions des rayons cathodiques : la conception corpusculaire anglaise, et la conception éthérée des Allemands. Selon lui, après sa propre détection de la charge portée par ces rayons et après la mesure de leur vitesse (bien inférieure à la vitesse de la lumière) par J. J. Thomson, la balance penche en faveur de la conception émissionniste. Il reste à comprendre comment les corpuscules cathodiques peuvent traverser une feuille d'aluminium (selon Lenard) et pourquoi

¹⁸ Benoist et Hurmuzescu 1896a, 1896b (avec remarque de Guillaume) ; Becquerel 1896e ; Guillaume 1896a.

leur déviation magnétique est toujours là même quelle que soit la nature du gaz résiduel dans le tube cathodique :

Il me semble qu'on lèverait ces difficultés en admettant que les particules matérielles qui formeraient les rayons cathodiques vont assez vite et diffèrent assez des molécules gazeuses ordinaires pour passer là où celles-ci seraient arrêtées.

C'est là une première suggestion, avant les expériences pertinentes de Wiechert et de J. J.

Thomson, que les particules cathodiques puissent différer des ions ordinaires. Perrin passe vite aux rayons X et à leurs diverses propriétés : propagation rectiligne, absence de réflexion, de réfraction et de diffraction, action sur les corps électrisés. Il les compare aux rayons de Becquerel, qui eux semblent pouvoir être réfléchis et réfractés, et seraient donc une sorte d'intermédiaire entre les rayons X et la lumière ultra-violette. Il juge probable que les rayons X soient du rayonnement électromagnétique de fréquence suffisamment élevée pour que leur indice optique soit proche de l'unité (remarque antérieure de Raveau). Enfin, il mentionne brièvement l'usage radiographique des rayons X, mais juge improbable qu'on puisse voir un jour voir autre chose que les os par cette méthode. Cette conférence est accompagnée d'une autre sur la construction des tubes de Crookes, par le directeur d'une fabrique d'instruments en verre soufflé, Victor Chabaud. Celui-ci reviendra sur ce sujet avec Hurmuzescu lors de la séance du 5 juin.¹⁹

Dans la séance du 17 avril, présidée par Henri Becquerel, Pellat présente les excellentes radiographies que Silvanus Thompson a obtenues en Angleterre grâce au "tube focus" composé d'une cathode hémisphérique et d'une anti-cathode plane inclinée et placée au centre de courbure de la cathode. James Chappuis, professeur à l'École centrale, présente ses propres dispositifs radiographiques, capables de révéler les calculs rénaux. Emmanuel Colardeau, professeur au Collège Collin, montre d'excellentes radiographies obtenues par un tube de son invention.

¹⁹ BSSFP (1896), pp. 112, 117 ; Perrin 1896b, p. 124 ; Chabaud 1896a ; Chabaud et Hurmuzescu 1896.

Chappuis et Colardeau compareront leurs formes de tube lors de la séance du 19 juin, avec une intervention de Guillaume.²⁰

Le 17 juillet, Jean Perrin annonce que ses expériences sur les effets électriques des rayons X confirment l'hypothèse d'une conductivité induite par ionisation de l'air entre les métaux électrisés. Benoist rappelle sa priorité avec Hurmuzescu dans la découverte de décharge d'un électroscope par les rayons X et défend son hypothèse d'un effet photo-électrique généralisé, tout en admettant la coexistence de l'effet envisagé par Perrin et Thomson. Il s'ensuit une longue discussion sur la validité des méthodes de mesure de l'intensité des rayons X suivant les procédures de Benoist et Hurmuzescu.²¹

Le 20 novembre, Becquerel revient sur ses sels d'urane et constate que leur activité n'a pas diminué depuis plusieurs mois dans l'obscurité. Il est de plus en plus intrigué par cette énergie qui semble venir de nulle part. Par ailleurs, il constate que le rayonnement agit sur l'air d'un électroscope tout comme les rayons X. Chabaud montre de nouveaux tubes à rayons X. Le 4 décembre, Perrin présente de nouvelles expériences selon lesquelles l'ionisation dans un gaz par un faisceau de rayons X est proportionnelle à l'intensité de ce faisceau et à la densité d'un gaz, contrairement à un résultat antérieur de Benoist et Hurmuzescu, selon lequel la décharge d'un électroscope est proportionnelle à la racine carrée de la densité du gaz. Benoist défend sa conception, et Guillaume soutient Perrin en affirmant que seule la conception ionique de Perrin permet de comprendre diverses anomalies observées par des chercheurs italiens (Emilio Villari et Augusto Righi). Guillaume juge vraisemblable que l'ionisation explique aussi, directement ou indirectement, les actions photographiques et physiologiques des rayons X. Il cède la parole à

²⁰ *BSSFP* (1896), p. 137–138 (Pellat) ; Chappuis 1896 ; Colardeau 1896a, 1896b (avec interventions de Chappuis et Guillaume).

²¹ Perrin 1896c ; Benoist et Hurmuzescu 1896c.

Broca, qui agite la question de l'épilation par rayons X, d'une manière qu'on ne peut lire sans frémir :²²

Les poils tombent, mais avec la peau. Les circonstances dans lesquelles se produisent les escarres sont d'ailleurs très remarquables. Il faut une certaine intensité pour que l'action puisse se produire. Quel que soit le temps de pose, si les rayons ne sont pas très puissants, rien ne se produit ; mais, si une partie de la surface du corps est placée à 3 ou 4 centimètres d'un tube puissant, et pendant une demi-heure, des faits très curieux se produisent. Pendant un laps de temps qui peut varier de quelques jours à trois semaines, aucun effet n'est apparent. Puis, une escarre se forme, très longue à cicatriser. Là où la peau est remplacée par du tissu cicatriciel, les poils ont disparu. Mais les poils repoussent partout ailleurs. Ceci montre que les rayons X ne peuvent servir comme moyen pratique d'épilation. Il faut aussi noter ce fait que les rayons X produisent sur la peau leur action à longue échéance. Il semble que les cellules cutanées sont atteintes par l'énergie X dans une propriété essentielle, que leur nutrition ne peut plus se produire, et qu'elles meurent alors au bout d'un temps plus ou moins long.

Le 15 janvier 1897, le président sortant Edmond Bouty, Directeur du Laboratoire d'enseignement de la physique de la Sorbonne, prononce l'allocution traditionnelle de début d'année. On peut y lire :

La découverte la plus surprenante dont vous ayez eu à vous occuper est incontestablement celle des rayons X, qui a passionné les savants du monde entier. Vous n'avez pas entendu, à cet égard, moins d'une dizaine de communications, notamment de M. Perrin qui, le premier, a répété devant vous les principales expériences de Röntgen et étudié l'action indirecte des rayons X sur des corps électrisés qu'ils ne touchent pas ; de MM. Benoist et Hurmuzescu, aussi sur l'action électrique des rayons X ; de M. Sagnac, sur les illusions de pénombre qui accompagnent l'action fluorescente ou photographique de ces rayons ; de MM. Chappuis, Colardeau et Chabaud, sur la technique ou les applications des tubes de Crookes et des photographies par les rayons X, dont ils vous ont présenté de si remarquables exemples ; de M. Guillaume, sur la coordination et l'interprétation de tant de résultats épars.

M. Becquerel a découvert de nouveaux rayons jouissant de propriétés analogues à celles des rayons X, mais émis, dans des conditions toutes différentes, par certains corps phosphorescents. Il a ainsi contribué, pour une large part, aux progrès de la science dans ces régions presque inexplorées de la physique.

²² *BSSFP* (1896), p. 269 (Becquerel), pp. 273–274 (Chabaud) ; Perrin 1896d ; *BSSFP* (1896), pp. 289–290 (Benoist) ; Guillaume 1896b ; Broca 1896b.

La contribution de Sagnac incluse dans ce bilan enthousiaste de Bouty est l'objet de la première communication de l'année. Georges Sagnac, alors agrégé préparateur à l'École normale, y montre que la diffraction des rayons X prétendument observée par certains de ses collègues n'est en fait qu'une illusion de pénombre, liée à la propagation rectiligne des rayons X et à l'étendue finie de leur source. Le 19 février, Benoist présente une étude électrométrique de l'absorption des rayons X par diverses substances. Le constructeur d'instruments Arthur Radiguet annonce sa découverte d'une lumière induite par l'impact des rayons X sur le verre. Guillaume en déduit que la luminescence du verre lors de l'impact des rayons cathodiques est probablement un effet secondaire de l'émission X lors de cet impact.²³

Lors de la séance du 19 mars, Jean Perrin introduit, dans l'étude de la décharge électrique par les rayons X, la distinction entre "l'effet gaz" qu'il a découvert et "l'effet métal" découvert par Benoist et Hurmuzescu. Il s'ensuit une discussion avec Benoist sur la validité de la loi de la racine carré de la densité pour l'effet métal. D'une part, les rayons X peuvent ioniser un gaz loin de toute surface métallique, d'autre part leur impact sur une surface métallique provoque une ionisation des molécules contiguës. Le 16 juillet, Raveau rapporte que Röntgen a observé une radiation secondaire de l'air soumis aux rayons X, qu'il juge que les rayons cathodiques et les rayons X sont fondamentalement de même nature et que la production des rayons X à l'anticathode est un genre de fluorescence. Sagnac fait alors remarquer que le rayonnement secondaire de Röntgen ne saurait être identique aux rayons X, point qu'il développera lors de la séance du 17 décembre. En cette fin d'année, il présente de nouvelles expériences montrant que le pouvoir de pénétration des rayons secondaires émis lors de l'impact des rayons X sur un métal dépend de la nature de ce métal. Il pense aussi que l'effet de ces rayons secondaires sur le gaz

²³ Sagnac 1897a ; Benoist 1897a ; Radiguet 1897 (avec remarque de Guillaume). Sur les travaux de Sagnac concernant les rayons X, cf. Quentin 1996 ; Darrigol 2014, pp. 797–801.

environnant doit se substituer à l'effet métal de Perrin. Quant à la nature de ces nouveaux rayons, il imagine un rayonnement électromagnétique de longueur d'onde intermédiaire entre celles des rayons X et celle des rayons ultra-violet. La production des rayons secondaires serait alors un genre de fluorescence.²⁴

Les rayons uraniques sont relativement peu discutés en cette année 1897. Becquerel expose seulement quelques effets électriques de ces rayons, comparables à ceux des rayons X. Mais une nouvelle découverte, celle de l'effet Zeeman, est présentée par Alfred Cornu, professeur de physique expérimentale à l'École polytechnique, lors de la Séance du 5 novembre. Grand spécialiste de l'optique, Cornu améliore considérablement la précision des observations de Zeeman, et il propose sa propre interprétation "cinématique" du phénomène: une lumière polarisée rectilignement dans l'axe du champ magnétique n'est pas affectée par ce champ; la fréquence d'une lumière polarisée circulairement autour du même axe est modifiée, positivement si la rotation de la polarisation se fait dans le même sens que le courant du solénoïde produisant le champ, négativement dans le cas contraire. Il ne fait que brièvement mention à la théorie "électrochimique" de Lorentz. Lors de la même séance, Broca rapporte qu'aucun déplacement de fréquence n'a lieu quand le champ agit sur le milieu de propagation de la lumière et non sur la source lumineuse.²⁵

L'année suivante, le 18 mars 1898, Broca s'inspire vaguement de la conception de Lorentz de l'effet Zeeman, basée sur l'altération du mouvement des ions intra-atomiques dans le champ magnétique, pour imaginer et vérifier un effet analogue du champ magnétique sur les rayons cathodiques : selon lui une partie de ces rayons s'enroulent autour des lignes de forces magnétiques mais une autre suit ces lignes de force, en analogie avec l'absence de déplacement

²⁴ Perrin 1897a ; Benoist 1897b ; Raveau 1897 ; Sagnac 1897b, 1897c.

²⁵ H. Becquerel 1897 ; Cornu 1897 (avec remarque de Broca).

Zeeman pour la lumière polarisée parallèlement aux lignes de force. Sagnac poursuit l'exposé de ses expériences sur la fluorescence des rayons X et il est élu membre de la Société le 2 décembre. Curieusement, aucune mention n'est faite cette année-là du "corpuscule" de J. J. Thomson ou des "atomes d'électricité" de Wiechert. Mais Paul Villard, qui s'était déjà fait remarquer au laboratoire de chimie de l'École normale par des améliorations apportées aux tubes de Crookes, donne trois exposés, le 21 janvier, le 4 mars et le 20 mai, sur ses nombreuses expériences concernant les rayons cathodiques. Il y démontre l'existence d'un "afflux positif" de matière impactant la cathode. Il avance que les rayons cathodiques semblent partir du lieu d'impact de l'afflux, que l'hydrogène est le seul gaz susceptible de subsister dans ses tubes évacués et que l'efflux et les rayons cathodiques ont tous deux un effet chimique réducteur. Il en conclut que ces rayons sont faits d'hydrogène finement divisé et chargé négativement.²⁶

En 1899, les communications les plus marquantes concernent les découvertes de Marie et Pierre Curie dans le domaine de la radioactivité. Le 3 mars, Pierre expose leurs travaux conduisant à la découverte de nouveaux éléments radioactifs. Marie a d'abord testé l'effet ionisant de diverses substances pour découvrir la radioactivité du thorium. Elle s'est convaincue que la radioactivité était une propriété atomique des éléments et non une propriété des composés chimiques. Du fait que certains minerais comme la pechblende ont une radioactivité plus forte que le radium-métal, Marie a émis l'hypothèse qu'ils contenaient des éléments plus fortement radioactifs que l'uranium. Par des méthodes chimiques, avec l'aide de Pierre et du chimiste Gustave Bémont, elle est parvenue à identifier deux nouveaux éléments radioactifs, baptisés polonium et radium. Les Curie ne sont pas encore parvenus à isoler ces métaux. Mais leurs nouvelles préparations sont énormément plus radioactives que l'uranium et elles sont

²⁶ Broca 1898 ; Sagnac 1898a ; Villard 1898a, 1898b, 1898c. On Villard's work on cathode rays, cf. Lelong 1997, 2001.

susceptibles, comme les rayons X, d'exciter la fluorescence d'un écran au platinocyanure de baryum. Le général Bassot, qui préside la séance, présente à Madame Curie les félicitations de la Société. Le 15 décembre, Becquerel décrit ses expériences sur la fluorescence induite par ces substances intensément radioactives (prêtées par les Curie), et d'autres concernant la déviation magnétique des rayons émis par ces substances. Il conclut à l'existence de deux types de rayonnement, l'un susceptible d'être dévié par un champ magnétique et l'autre pas.²⁷

La radioactivité continue de jouer un rôle important l'année suivante à la SFP. Le 19 janvier 1900 Pierre Curie annonce les nouveaux résultats obtenus avec Marie : préparation de sources concentrées de radium par cristallisation fractionnée, propriétés physiques et chimiques du radium, invention d'un nouvel électroscope pour mesure la radioactivité (Pierre) et découverte de la radioactivité induite. Mascart applaudit :

M. MASCART considère les travaux qui viennent d'être exposés comme dignes des plus grands éloges. Le nom de M. Curie restera attaché à une nouvelle méthode physico-chimique qui conduira, sans doute, à des découvertes aussi admirables que la méthode instituée par Kirchhoff et Bunsen ou bien encore de Lord Rayleigh et Ramsay.

Le 16 février, Becquerel décrit de nouvelles expériences d'absorption et de déflexion magnétique des rayons du radium, confirmant leur hétérogénéité. Il note aussi que les rayons les plus déviés sont les plus absorbés. Le 2 mars, les Curie confirment l'hétérogénéité des rayons du radium, ainsi que l'hétérogénéité (en vitesse) de la fraction déviable de ces rayons. Ils ont prouvé que ces derniers rayons portent une charge négative. Le 4 mai, Becquerel donne la charge massique mesurée dans ses expériences de déflexion magnétique. Mais il s'abstient de conclure que les corpuscules déviés sont identiques à ceux des rayons cathodiques ; c'est pourtant ce qu'a fait Paul Langevin lors de la séance précédente. Quant aux rayons non-déviés du radium, les Curie et Becquerel pensent alors qu'ils sont aisément absorbables. Le 18 mai, Villard affirme au

²⁷ M. Curie et P. Curie 1899 ; H. Becquerel 1899a, 1899b. Sur la radioactivité et les Curie, cf. Malley 2011, chap. 2.

contraire que "le radium émet des rayons non déviables et extrêmement pénétrants, différents de ceux qui ont été observés jusqu'à ce jour." Il pense que ces rayons appartiennent à la famille des rayons X. Ce sont là les futurs "rayons gamma" d'Ernest Rutherford.²⁸

Par ailleurs, Villard continue d'affirmer que les rayons cathodiques sont faits d'hydrogène finement divisé, opinion qu'il ne changera qu'en 1908 au regard des progrès accomplis par J. J. Thomson et ses disciples. En France, le principal importateur de cette nouvelle physique anglaise est Paul Langevin, qui a passé l'année 1897–98 au Laboratoire Cavendish auprès de J. J. Thomson. Sa thèse, soutenue en 1902 et dirigée par Pierre Curie, porte sur les gaz ionisés. Dans sa première conférence à la SFP, prononcée le 20 avril 1900 à l'occasion de l'exposition de Pâques, Langevin rapporte, expériences à l'appui, les résultats obtenus dans ce laboratoire : l'universalité de la conduction ionique dans les gaz (la conduction est toujours liée à la production d'ions de mobilité bien définie), la condensation d'une vapeur sursaturée observée par C. T. R. (Charles Thomson Rees) Wilson et utilisée par Thomson pour mesurer la charge des particules cathodiques. La valeur mesurée de cette charge (comparable au quantum électrolytique de charge), combinée avec les mesures de déflexion magnétique (qui donnent la charge massique), implique une masse de l'ordre du millième de celle de l'ion hydrogène pour les "ions négatifs" issus du rayonnement cathodique, de l'effet photo-électrique, de l'effet thermo-ionique, ou du radium. Même si Langevin ne prononce pas encore le mot "corpuscule" à ce moment, il fait ainsi comprendre que Thomson et ses collaborateurs du Laboratoire Cavendish pensent avoir découvert un nouveau constituant universel de la matière.²⁹

²⁸ P. Curie et M. Curie 1900a, 1900b ; Mascart, *SSFP* (1900), p. 10* ; H. Becquerel 1900a, 1900b ; Langevin 1900, p. 40* ; Villard 1900a.

²⁹ Villard 1900b, 1908 ; Langevin 1900. Sur la physique des ions de Langevin, cf. Lelong 2005.

Le 3 mai 1901, Pierre Curie et son ami Sagnac décrivent leurs expériences établissant une charge négative des rayons secondaires émis par les métaux lourds. Ils jugent que ce rayonnement doit être analogue au rayonnement cathodique et aux rayons déviables du radium, et Sagnac souligne l'analogie avec l'effet photo-électrique, complétant ainsi l'analogie des rayons secondaires non chargés avec la lumière de fluorescence. Leur ami commun Langevin est élu membre de la SFP le 17 janvier 1902. Le 6 et le 20 juin, Langevin présente son travail de thèse sur les gaz ionisés en mettant l'accent sur les "corpuscules" de Thomson. L'année suivante, Pierre Curie prononce pour la première fois le mot "électron" à la SFP. Il fait allusion aux théories de l'électron de Max Abraham et d'autres, selon lesquelles la masse de l'électron dépend de sa vitesse. A la même époque Langevin travaille à sa propre théorie de l'électron (comme vacuole incompressible dans l'éther), qu'il n'exposera cependant pas à la SFP.³⁰

Le président de la SFP pour l'année 1902, le mathématicien Henri Poincaré, était lui-même un champion de cette nouvelle physique. Sagnac, Langevin, Maurice de Broglie et Marie Curie furent élus membres sous sa présidence. Dans son allocution de président sortant, prononcée le 16 janvier 1903, on peut lire :

Au sujet de ces admissions nouvelles, j'ai à vous signaler un événement nouveau ; pour la première fois des dames ont forcé notre porte et nous ne saurions trop nous en féliciter. Les progrès rapides qu'a fait l'instruction féminine rendaient cette innovation inévitable. Je n'ai pas à vous rappeler que l'une de vos nouvelles collègues porte un nom qui nous est doublement cher.

Le nom "doublement cher" est évidemment celui de Curie. Quelques lignes plus bas, l'esprit d'ouverture de Poincaré s'exprime de nouveau :

Permettez-moi de constater que deux de ces communications [de l'année précédente] nous sont venues d'Asie ; c'est une partie du monde qui veut rattraper le temps perdu. M. [Hantaro] Nagaoka nous a donné une étude sur la magnétostriction des aciers au nickel. C'est M. Guillaume qui nous l'a présentée, et il avait bien quelque droit à cet honneur ; et puis, à la

³⁰ Curie et Sagnac 1901 ; *BSSFP* (17 janvier 1902), p. 188 ; Langevin 1902a, 1902b, 1905e (electron) ; P. Curie 1903a.

séance de Pâques, M. [Jagadish Chandra] Bose nous a fait une intéressante conférence qui devait une saveur toute particulière à je ne sais quel mélange de ce sens profond de la matière, qui distingue les Anglo-Saxons, et du mysticisme métaphysique des Hindous.

Le travail de Nagaoka importait pour l'usage métrologique des nouveaux aciers développés par Guillaume. Bose s'était déjà fait remarquer par ses travaux sur les ondes radio et, de passage en France en 1902, il avait défendu devant la SFP une analogie profonde entre la réponse des conducteurs ordinaires et celle des tissus animaux et végétaux à une excitation électrique ou électromagnétique.³¹

Lors de la première séance de 1904, la SFP se félicite, en la personne de son président sortant, de l'attribution du prix Nobel à trois des siens : Henri Becquerel, Pierre et Marie Curie, pour leurs recherches sur la radioactivité. Dans les années suivantes, la France continuera d'exceller dans ce domaine, même si l'interprétation théorique définitive des processus radioactifs revient à Ernest Rutherford et Frederick Soddy (comme le reconnaît Pierre Curie à la SFP en 1905). La physique des ions gazeux continuera elle aussi de prospérer grâce à Langevin et ses disciples Eugène et Léon Bloch, Maurice de Broglie et Auguste Blanc. En 1908, Villard adoptera enfin le "corpuscule" de Thomson. La collection de mémoires publiée par la SFP en 1905 sous la direction de Henri Abraham et Paul Langevin et intitulée *Les quantités élémentaires d'électricité : ions, électrons et corpuscules* est le couronnement des efforts de la Société à promouvoir la nouvelle microphysique. On y trouve la plupart des travaux français et étrangers qui ont fourni la base expérimentale de ce type de recherche de Hittorf à Rutherford, mais aussi une abondante collection de mémoires théoriques touchant à la théorie des électrons et à l'électrodynamique des corps en mouvement, notamment ceux de Max Abraham, Lorentz,

³¹ Poincaré 1903a, pp. 6, 7 ; Nagaoka 1902 ; Bose 1902. Deux autres femmes entrèrent à la SFP en même temps que Marie Curie: Marcela Pollak-Wścieklica ("Licenciée ès Sciences physiques, à Sceaux") et Henriette Baudeuf-Baillard ("Professeur au Lycée de Jeunes Filles de Bordeaux") (*BSSFP* (1902), séance du 7 mars, p. 11*).

Wiechert, Poincaré et Langevin. Cette dernière composante compense heureusement la rareté des exposés théoriques dans les séances de la SFP.³²

À l'affût de la nouveauté

En cinq années, de 1895 à 1900 la physique s'est enrichie de nouvelles entités et de nouveaux effets interprétés à l'échelle atomique et moléculaire : les rayons X, l'électron, les rayons S de Sagnac, les rayons gamma, les particules alpha, l'effet Zeeman, la radioactivité, la fluorescence X, l'ionisation par les rayons X. Ces découvertes et leurs interprétations sont étroitement liées les unes aux autres : les rayons X proviennent de l'impact des électrons sur une cible matérielle, les rayons S d'une transformation des rayons X par la matière ; la radioactivité, découverte dans l'espoir d'une relation entre fluorescence et émission X, produit les rayonnements alpha, beta et gamma ; l'effet Zeeman fait intervenir le mouvement intra-atomique des électrons.

Je n'ai pour le moment retenu que les entités et effets qui ont résisté à l'épreuve du temps. Mais quelques physiciens Français se firent bientôt remarquer par des propositions plus fragiles : les rayons N de Blondlot ; les rayons magnéto-cathodiques de Broca et Villard ; la magnéto-résistance de Pellat ; et les électrons positifs de Jean Becquerel. Toutes ses découvertes furent discutées à la SFP, et les deux premières suscitèrent l'intérêt de Poincaré.

Le cas le plus connu est celui des rayons N. Prosper-René Blondlot, professeur de physique à l'université de Nancy, était l'auteur respecté d'expériences sur le rayonnement électromagnétique ainsi qu'un habile concepteur d'appareillage dans ce domaine. En 1903, alors

³² *BMSSP* (15 janvier 1904), p. 2* ; P. Curie 1905 ; Villard 1908b ; Abraham et Langevin, *QEE*. Deux conférences exceptionnelles de Marie Curie et de André Debierne à la SFP résument les progrès des recherches sur la radioactivité dans les années suivantes (M. Curie 1912 ; Debierne 1912). Les communications à la SFP concernant la physique des ions comprennent Langevin 1905b, 1905c, 1908, 1910 ; E. Bloch 1904, 1905, 1908, 1910 ; L. Bloch 1910 ; E. et L. Bloch 1908 ; M. de Broglie, 1907, 1909 ; M. de Broglie et Brizard 1910 ; Blanc 1908, 1911.

qu'il étudiait la polarisation des rayons X issus d'un tube focus au moyen des variations d'éclat de petites étincelles électriques, il en vint à observer la réfraction des rayons détectés par ce moyen subtil en interposant un prisme de quartz sur leur trajet (il avait d'abord observé la rotation de la polarisation sous l'effet d'une lame de quartz et en concluait que les indices du quartz différaient de l'unité pour le rayonnement observé). Comme par les moyens usuels de détection (fluorescence ou photographie) l'absence de réfraction des rayons X était bien établie, Blondlot attribua ses observations à un nouveau type de rayons, capable comme les rayons X de traverser une quantité considérable de matière opaque, mais plus semblables à la lumière dans leurs propriétés de polarisation et de réfraction. Il nomma ces rayons "n" puis "N" pour la ville de Nancy. Dans sa première note du 23 mars 1903 pour les *Comptes rendus*, la source est un tube focus. C'est un bec de gaz dans une note du 11 mai, puis divers corps incandescents dans une note du 25 mai et enfin le soleil dans une note du 15 juin. Blondlot détectait alors les rayons par un mini-éclateur relié à une toute petite bobine d'induction. Et il croyait observer un pic d'intensité au foyer d'une lentille de quartz.³³

Les rayons N firent l'objet d'un premier exposé à la SFP le 5 juin 1903 : à partir des observations publiées par Blondlot, Sagnac juge que de la diffraction (liée au diamètre fini de la lentille) est intervenue et que cette diffraction correspond à une longueur d'onde de l'ordre du dixième de millimètre, intermédiaire entre le rayonnement ultra-violet et le rayonnement hertzien. Il suggère de nouvelles observations qui permettraient de confirmer les effets de diffraction. Poincaré, présent à cette séance, opine que Blondlot a déjà ce type d'observation en main. Dans les mois qui suivent, plusieurs physiciens, surtout français, reproduisirent les observations de Blondlot. Mais les meilleurs experts étrangers n'y parvinrent pas. Lors d'une

³³ Blondlot 1903a, 1903b, 1903c, 1903d. Sur l'épisode des rayons N, cf. Nye 1980.

visite au laboratoire de Blondlot, le physicien américain Robert Wood ôta subrepticement le prisme défecteur lors d'une expérience de Blondlot, et celui continua néanmoins à voir une réfraction des rayons N. Cet incident, rapporté en 1904 dans *Nature*, ôta toute crédibilité aux résultats de Blondlot, tout au moins à l'étranger. Sa bonne foi ne fut pas contestée, mais on le jugea victime d'un phénomène d'autosuggestion rendu probable par la ténuité des étincelles observées.³⁴

Dans une conférence de Pâques de la SFP, le 7 avril 1904, le professeur de physique médicale à Nancy, Augustin Charpentier, "rend hommage au grand nom de M. Blondlot" et rapporte ses expériences révélant les sources et effets physiologiques des rayons N. Mais deux ans plus tard, le 16 mars 1906, le Bordelais Albert Turpain, spécialiste de télégraphie sans fil et habitué des petites étincelles, rapporte les difficultés qu'il a eues à confirmer les résultats de Blondlot, souligne l'importance que l'observateur ne sache pas si les rayons N sont en action ou non, et penche pour des effets d'autosuggestion. Il reconnaît cependant l'autorité de Blondlot et suggère (comme Wood) que celui-ci et son contradicteur allemand Heinrich Rubens répètent ensemble les expériences, suivant l'exemple des expériences de Crémieu (dont il sera question plus bas). Villard et Adrien Guébbard (professeur de physique à la faculté de médecine de Paris), présents à cette séance, pensent aussi que Blondlot et ses collaborateurs ont été victimes d'autosuggestion. On ne parlera plus de rayons N à la SFP.³⁵

Lors de la séance du 18 mars 1898, Broca introduit sa distinction entre deux espèces de rayons cathodiques : ceux qui s'enroulent autour des lignes de force magnétique comme le prévoit un calcul de Poincaré pour le mouvement de particules chargées dans un champ

³⁴ Sagnac 1903 ; Poincaré 1903b ; Wood 1904.

³⁵ Charpentier 1904 ; Turpain 1906 (avec remarques de Villard et Guébbard). Turpain avait d'abord soumis son texte aux *Comptes rendus*, mais Mascart l'avait rejeté car il pensait avoir confirmé les résultats de Blondlot. En revanche, Perrin et Langevin avaient aussitôt contesté ces résultats. Cf. Nye 1980, pp. 143–144, 151.

magnétique, et ceux qui suivent strictement les lignes de force magnétique. Le 3 juin 1904, Villard revient sur ce sujet et déclare avoir démontré que les nouveaux rayons, qu'il appelle "magnéto-cathodiques" ne portent pas de charge électrique, qu'ils sont accélérés le long des lignes de force magnétique et que, dans un champ électrique, ils sont déviés perpendiculairement à ce champ et tendent à s'enrouler autour des lignes de force. Il y a donc une sorte de dualité électrique–magnétique : les nouveaux rayons seraient porteurs d'une charge magnétique. Le 17 juin, Charles Fortin montre que des électrons étroitement enroulés en spirale autour des lignes de force magnétique subiraient eux aussi une déviation perpendiculaire dans un champ magnétique. Mais Villard pense que ses rayons ne portent pas de charge électrique et, le 17 février 1905, Villard décrit de nouvelles expériences confirmant l'existence des rayons magnétocathodiques. Perrin et Langevin objectent que les prétendus nouveaux rayons pourraient simplement résulter du guidage magnétique des électrons de faible vitesse produits lors de l'ionisation du gaz résiduel par les électrons cathodiques. Villard reconnaît que cette interprétation est séduisante, mais juge qu'elle ne suffit pas à rendre compte de la totalité de ses observations. Le 4 mai 1906, Villard présente de nouvelles expériences sur les rayons cathodiques et magnéto-cathodiques, surtout dans le but de contredire les théories donnant un rôle primordial à l'ionisation du gaz résiduel. Eugène Bloch reproche à Villard d'avoir mal compris la théorie ionique. Broca rappelle qu'il a le premier, en 1898, introduit les nouveaux rayons, et qu'il préfère continuer de les appeler *rayons cathodiques de seconde espèce* pour ne point préjuger de leur nature profonde. Lors de sa conférence du 28 avril pour l'exposition de Pâques 1908, Augusto Righi, professeur de physique à l'université de Bologne et champion de la nouvelle physique des ions et des électrons, redonne l'explication de Langevin et Perrin, mais propose aussi que les nouveaux rayons soient constitués de systèmes planétaires binaires ion–électron, résultant de la capture d'un électron par un ion

positif. Lors de la séance du 4 mai, Villard propose une nouvelle théorie des aurores boréales comme résultant de la production de rayons cathodiques dans le champ magnétique terrestre. Il admet désormais l'existence des "corpuscules" de Thomson, mais il persiste à croire aux rayons magnétocathodiques. En 1911, le Lyonnais Louis Georges Gouy donnera des preuves de l'interprétation électronique de ces rayons. Pendant une dizaine d'année Righi et de nombreux disciples italiens poursuivront l'hypothèse des doublets, sans convaincre personne au-delà des Alpes.³⁶

Un autre exemple de découverte fugace est celui de la *magnétofriction*, proposée par Henri Pellat, titulaire de la chaire de physique expérimentale à la Sorbonne, lors de la séance du 6 février 1903 avec expériences à l'appui. De ses observations de l'effet d'un champ magnétique fort sur les rayons cathodiques, Pellat déduit qu'ils sont soumis à un frottement magnétique anisotrope. Ce frottement tend à canaliser le faisceau cathodique le long des lignes de force, sans l'enroulement spiral qui aurait lieu en l'absence de frottement. Dans la discussion, Broca rappelle ses observations de 1898, impliquant un enroulement des rayons de première espèce autour des lignes de force, et un mouvement suivant strictement les lignes de force pour les rayons de seconde espèce. Pellat ne nie pas l'effet d'enroulement, mais il affirme que l'enroulement disparaît complètement en champ fort, ce que seule l'hypothèse de la magnétofriction permet de comprendre. Le 4 mars 1904, Pellat réaffirme sa découverte dans le cadre d'une analyse magnétique de la colonne anodique dans les tubes cathodiques. Dans la même année, Villard rejète la magnétofriction et impute la canalisation magnétique des rayons cathodiques à leur

³⁶ Broca 1898, 1906 ; Villard 1904b, 1904c, 1905, 1906, 1908a ; Fortin 1904 ; Perrin et Langevin 1905 ; Bloch 1906 ; Righi 1908 ; Gouy 1911. Sur les rayons magnétocathodiques et sur le programme de Righi, cf. Carazza et Kragh 1990.

composante magnétocathodique. Il s'ensuit une longue polémique dans les *Comptes rendus*, de laquelle Villard sortit vainqueur.³⁷

Parmi les soutiens de Blondlot dans l'affaire des rayons N se trouvait Jean Becquerel, fils de Henri élu en 1909 sur la chaire de physique appliquée aux sciences naturelles du Muséum national d'histoire naturelle. Comme le rapporte Alexandre Dufour (normalien, auteur d'une thèse primée sur les spectres de l'hydrogène, et professeur au Lycée Louis le Grand) dans la séance du 5 juin 1908, le jeune Becquerel avait alors deux arguments en faveur de l'existence d'électrons positifs. Premièrement, l'effet Zeeman de polarisation inverse, observé par Dufour, suggérait l'existence de telles particules à l'intérieur de l'atome. Deuxièmement, Becquerel pensait avoir observé, au voisinage de l'anode d'un tube cathodique, des rayons se courbant dans un champ magnétique comme s'il s'agissait d'électrons positifs. Dans la même séance du 5 juin 1908, Aimé Cotton critique les expériences de Becquerel. Le 2 avril 1909, Dufour présente des expériences démontrant que la courbure observée par Becquerel est un effet indirect de la courbure des rayons cathodiques sur l'afflux positif de Villard, lequel se compose d'ions positifs ordinaires. Dans une discussion assez aigre, Becquerel affirme que sa proposition d'électrons positifs n'est qu'une hypothèse, à son avis la plus apte à expliquer l'effet Zeeman inverse de Dufour. Quant à ses expériences sur les rayons positifs, il pense qu'elles diffèrent suffisamment de celles de Dufour pour que son interprétation reste possible. Il propose à Dufour de refaire les expériences avec lui. Celui-ci décline l'offre et suggère plutôt à Becquerel d'amener son matériel lors d'une prochaine séance de la SFP, pour qu'on puisse comparer les expériences concurrentes. Enfin Marcel Moulin, collaborateur de Langevin, prend la parole pour rappeler que les expériences récentes de J. J. Thomson sur la diffusion des rayons X et des rayons beta par les gaz suggèrent

³⁷ Pellat 1903, 1904a, 1904b ; Broca 1903 ; Villard 1904a. Sur cette polémique, cf. Lelong 2001, pp. 152–153.

que le nombre d'électrons dans un atome est de l'ordre de son poids atomique, si bien que l'atome d'hydrogène n'aurait qu'un seul électron ou guère plus. Alors, la masse de l'atome ne pourrait s'expliquer qu'en admettant un "centre positif" de masse comparable, en conformité avec les masses observées pour les rayons canaux. Moulin était donc prêt à admettre l'existence du noyau atomique, deux ans avant la proposition de Rutherford.³⁸

Dans l'effervescence d'une nouvelle physique, il n'était pas facile de séparer l'ivresse du bon grain. En témoigne l'allocution du président sortant, l'astronome et spectroscopiste Henri-Alexandre Deslandres, dans la première séance de 1909 :³⁹

Certes, le domaine que la Physique a offert aux chercheurs a toujours été très vaste ; mais, dans ces dernières années, de grandes voies nouvelles ont été ouvertes par la radioactivité, par l'étude pénétrante des particules très petites de la matière, de leurs propriétés, de leurs mouvements, de la charge électrique élémentaire qui leur est attachée, de leurs actions à distance propagées par l'éther interposé.

Ces particules échappent à nos sens imparfaits et souvent aussi à nos appareils les plus délicats, mais leur intervention semble nécessaire pour expliquer les phénomènes de plus en plus complexes que l'observation révèle. Nous sommes alors obligés de les deviner en quelque sorte ; et comme l'aveugle avec son bâton, de déterminer leur manière d'être par des tâtonnements successifs, appuyés constamment sur le contrôle de l'expérience.

Or, à cette recherche primordiale, les hommes de science de tous les pays sont actuellement attachés, et je suis heureux de constater que, dans celle marche vers le progrès, la France et notre Société sont au premier rang.

A notre actif, nous avons les grands noms de Becquerel et de Curie qui ont été des initiateurs du mouvement ; et si l'on se borne aux seuls travaux de l'année dernière, la moisson qui nous est propre est abondante.

Je rappellerai les très belles expériences de M. Villard, qui reproduisent toutes les formes si capricieuses des aurores boréales et leur assurent une explication simple par les rayons cathodiques.

Les recherches sur l'ionisation et la radioactivité nous ont valu les communications si intéressantes de MM. Langevin, Moulin, Léon et Eugène Bloch, de MM. Cheneveau et Laborde.

Je citerai aussi avec grands éloges les belles découvertes de MM. Jean Becquerel et Dufour, et, en particulier celles qui révèlent un phénomène inverse de celui de Zeeman, et qui peuvent s'expliquer par des électrons positifs. Dans le même ordre d'idées, M. Hadamard

³⁸ Dufour 1908 (pp. 252–253), 1909 ; J. Becquerel 1908a, 1908b, 1909 ; Cotton 1908 ; 1909. On this episode, cf. Dahl 1997, pp. 257–264. Moulin fut nommé professeur à la Faculté de Besançon en 1910. Il est mort sur le champ de la bataille de la Marne le 6 septembre 1914.

³⁹ Deslandres 1909. Voir plus bas pour les travaux de Pierre Weiss et de Victor Henri auxquels Deslandres fait allusion.

nous a exposé les théories de M. Ritz, qui expliquent complètement les séries de raies dans les spectres par le mouvement d'électrons dans un champ magnétique moléculaire, analogue à celui déjà considéré par M. Pierre Weiss.

A ces recherches on peut rattacher les études sur les colloïdes de MM. Mallitano et Victor Henri ; ce dernier a eu le grand mérite de réaliser l'enregistrement cinémaphotographique des particules décelées par l'ultra microscope, et l'étude expérimentale du mouvement brownien.

La propension française à imaginer de nouvelles particules et de nouveaux effets allait de pair avec une facilité à sortir de cadres théoriques ailleurs jugés bien établis. Les rayons magnétocathodiques de Villard contredisaient la théorie électromagnétique ordinaire en admettant des charges magnétiques se mouvant dans un champ électrique comme les charges électriques se meuvent dans un champ magnétique. Les électrons positifs de Jean Becquerel sortaient du cadre restreint de la théorie de Lorentz (même si Larmor avait temporairement imaginé un modèle de l'atome composé d'un nombre égal d'électrons positifs et négatifs). La magnétofriction de Pellat contredisait le travail nul des forces magnétiques ordinaire. Les rayons N de Blondlot pouvaient sembler plus conservateurs de par leur nature électromagnétique supposée, mais ils contredisaient les théories connues de l'absorption des ondes électromagnétiques aux longueurs d'ondes admises.

Revenons au début du siècle. Lors de la séance du 2 mars 1900, Camille Raveau, physicien au Laboratoire d'essais du Conservatoire national des arts et métiers, n'hésite pas à remettre en question la loi élémentaire des interactions courant-courant, d'une manière que Lorentz et les héritiers de Maxwell auraient sans doute jugée incongrue. Il considère aussi que la question de l'entraînement des lignes de force lors de l'induction unipolaire reste ouverte, alors que, comme le rappelle l'ingénieur électricien André Blondel dans une discussion lors de la séance suivante, la théorie de Maxwell ne laisse aucun doute à cet égard : les lignes de force en tant que propriétés du champ de l'aimant ne suivent pas l'aimant dans sa rotation. Dans cette

même discussion, l'ingénieur agricole Victor Crémieu, alors étudiant en thèse de Lippmann à la Sorbonne, admet curieusement que l'électricité circule dans les conducteurs à la vitesse de la lumière et il avance que par un effet de convection, le courant dans un solénoïde en rotation autour de son axe doit être modifié ; une induction unipolaire devrait en résulter quand la vitesse de rotation varie.⁴⁰

La thèse de Crémieu portait sur l'électrodynamique des corps en mouvement, en particulier sur l'effet d'un champ magnétique variable sur une particule chargée. Cet effet est en quelque sorte l'effet réciproque de l'action magnétique d'un courant de convection, et il est une conséquence de la théorie de Maxwell. Comme les expériences de Crémieu ne confirmaient pas cet effet, il commença à douter de l'action magnétique des courants de convection, pourtant confirmée par Henry Rowland en 1878 à l'aide d'un disque tournant électrisé. Il entreprit donc une variante de l'expérience de Rowland dans laquelle une rotation transitoire du disque devrait induire un courant dans une bobine proche. L'enjeu était considérable, car les théories dominantes de Hertz et de Lorentz admettaient toutes les courants de convection comme source du champ magnétique et car ces courants jouaient un rôle essentiel dans la théorie de Lorentz par la convection des électrons. Poincaré, à l'affût de nouveautés expérimentales et toujours prêt à remettre en question les grandes théories, devint vite le principal conseiller de Crémieu (avec Blondlot) dans la conception et l'exécution de ses expériences. Crémieu annonce ses premiers résultats lors de la séance du 6 juillet 1900 : "J'en conclus qu'une charge en mouvement ne produit pas de champ magnétique. — Cette conclusion de fait conduit logiquement à rejeter les théories actuelles du courant électrique." Le 21 décembre, il déclare avoir obtenu un résultat

⁴⁰ Raveau 1900 ; Blondel 1900 ; Crémieu 1900a. L'induction unipolaire est l'induction électromagnétique produite par la rotation d'un aimant cylindrique autour de son axe. Le courant induit est recueilli par un fil rigide dont les extrémités sont en contact glissant reliés avec le méridien de l'aimant et l'un de ses pôles. Sur l'histoire de l'induction unipolaire, cf. Miller 1981b.

négligé dans un dispositif plus proche que celui de Rowland (dans lequel la rotation du disque est permanente et le champ magnétique est détecté par une aiguille aimantée). Lors des séances du 15 février et du 3 mai 1901, il donne un exposé plus détaillé de ces expériences et en décrit d'autres, en partie suggérées par Poincaré, visant à identifier une erreur de Rowland.⁴¹

Dans les mois qui suivent, Crémieu doit faire face aux critiques de spécialistes étrangers. En particulier, un disciple de Rowland, Harold Pender, a repris l'expérience d'induction par une convection variable et obtenu un résultat positif. Le 2 décembre 1902, Crémieu fait le bilan des nouvelles expériences devant la SFP et reconnaît qu'à cette occasion il a pris conscience de bien des difficultés insoupçonnées. En particulier, la couche isolante sur ses disques tournants électrisés semble affecter leur charge de manière incontrôlée. Il conclut "qu'il faudra encore beaucoup d'expériences et, par conséquent, beaucoup de temps pour arriver à éclairer tous les points du débat et à en dégager une conclusion à l'abri de toute critique." Sur l'initiative de Poincaré, Pender est alors invité à "travailler contradictoirement" avec Crémieu dans le laboratoire de Bouty à la Sorbonne. Crémieu et Pender exposent leurs résultats lors de la séance de Pâques du 17 avril 1903. Ils rapportent qu'ils ont repris leurs expériences et confirmé leurs résultats contradictoires. Mais grâce à quelques modifications, il s'avère que l'effet obtenu dans le dispositif de Pender est quantitativement en accord avec le champ magnétique associé au courant de convection. Par ailleurs, il devient clair que le caoutchouc isolant des disques de Crémieu a masqué l'effet recherché. Le lendemain, un autre étudiant en thèse de Lippmann, le Roumain Nicolae Vasilescu Karpen, annonce qu'il a définitivement vérifié l'effet Rowland avec un

⁴¹ Crémieu 1900a, 1900b, 1901a, 1901b, 1901c. Sur l'expérience de Rowland, cf. Buchwald 1985, pp. 73–77. Sur les expériences de Crémieu et le rôle de Poincaré, cf. Indorato et Masotto 1989.

dispositif plus sensible que ceux de ses prédécesseurs. L'affaire est close, même si Crémieu poursuivra l'étude de l'effet inhibiteur du caoutchouc.⁴²

3. Le congrès international de physique de 1900

Nous venons de voir que dans la décennie 1895–1905, les séances de la SFP donnèrent une place considérable à la découverte et à l'étude de nouveaux rayonnements. Cette activité reflète la forte contribution française à une nouvelle microphysique expérimentale. En revanche, comme le déplore Marcel Brillouin dans son histoire de la SFP, on trouve très peu d'exposés théoriques et presque rien concernant les théories les plus novatrices de Boltzmann, Lorentz, Planck, ou Einstein. Il y a deux raisons à cela : le public des séances n'est en moyenne pas équipé pour comprendre les théories les plus avancées, et à quelque rares exceptions comme Pierre Curie, Marcel Brillouin, Henri Poincaré ou Alfred Liénard, les Français contribuent peu aux développements de la physique théorique au tournant du siècle.⁴³

Mais il ne faut pas conclure trop vite que la SFP ne s'intéressait pas du tout à ces développements théoriques. On se convainc vite du contraire en lisant les rapports du premier congrès international de physique, organisé par la SFP dans le cadre de l'Exposition universelle de 1900. Dans son discours d'ouverture, le président Alfred Cornu présente le congrès comme de "grandes assises de la physique moderne" et félicite les participants pour l'originalité, la concision et la profondeur de leurs rapports, allant bien au-delà d'un résumé sommaire des points controversés de la science. En effet, ces rapports donnent une idée de ce qui, aux yeux des membres les plus influents de la SFP et de ses invités, constituait les principales avancées de la physique à la fin du siècle. Dans leur "Avertissement," les deux secrétaires généraux Charles-

⁴² Crémieu 1902 ; Pender et Crémieu 1903 ; Karpen 1903.

⁴³ M. Brillouin 1925, p. 16–18.

Édouard Guillaume et Lucien Poincaré notent que le comité d'organisation, présidé par Cornu "tomba facilement d'accord qu'il y aurait un intérêt majeur à tracer à grands traits le tableau des idées et des hypothèses par lesquelles on cherche aujourd'hui à expliquer la constitution de la nature et les lois qui la régissent." On lit plus loin qu'il n'a pas été facile de classer les diverses contributions car "les anciens cadres où l'on se plaisait autrefois à enfermer les divers chapitres de la Physique éclatent de toutes parts, mille et mille sentiers sillonnent maintenant ces régions qui n'étaient parcourues autrefois que par de grandes routes isolées et droites." Néanmoins, le Comité a décidé de répartir les rapports en trois tomes thématiques.⁴⁴

Le premier volume, intitulé "Questions générales, métrologie, physique mécanique, physique moléculaire" commence par une brillante allocution de Henri Poincaré sur "Les relations entre la physique expérimentale et la physique mathématique." À rebours de l'expérimentalisme assez étroit des séances de la SFP, Poincaré défend la physique mathématique comme un moyen efficace d'exprimer nos connaissances dans un cadre clair, simple, unifié et prédictif. L'expérience, même si elle est la source de toute vérité, ne peut se passer de présupposés généralisateurs. Une bonne théorie ne saurait donc se passer d'hypothèses. Celles-ci sont de quatre sortes: les hypothèses inconscientes, colportées par le langage ordinaire, sont dangereuses et il vaut mieux les éviter en utilisant le langage mathématique; les hypothèses naturelles, par exemple celle qui exclut l'interaction d'objets éloignés, sont les plus sûres; les hypothèses indifférentes n'apportent rien au contenu empirique d'une théorie mais elle peuvent jouer un rôle heuristique important; enfin, les véritables généralisations peuvent être infirmées ou confirmées par l'expérience. Certes les théories sont périssables, mais il ne faut pas en conclure à la "faillite de la science" annoncée par certains contemporains de Poincaré, car de nos meilleures

⁴⁴ Cornu, *RCIP* 4, p. 6 ; Guillaume et L. Poincaré 1900, pp. v, viii.

théories nous pouvons extraire des rapports vrais qui subsisteront quand des théories plus profondes verront le jour. Le succès des mathématiques dans la formulation des théories physiques est lié à la possibilité de décomposer les phénomènes physiques en phénomènes élémentaires simples et tous homogènes les uns aux autres. La simplicité un jour atteinte peut être remise en question et, dans un stade ultérieur de la physique, se réduire à l'action combinée de constituants plus élémentaires. Par exemple, il se peut que la simplicité de la thermodynamique ne soit qu'une conséquence de la loi des grands nombres appliquée à une myriade de molécules. Poincaré ne se prononce pas définitivement sur la valeur de la théorie cinétique moléculaire. Elle permet d'atteindre de nouveaux rapports vrais mais elle "a coûté de grands efforts et a été en somme assez peu féconde ; elle pourra le devenir." Cependant, les recherches de Gouy sur le mouvement brownien pourraient confirmer la violation que cette théorie implique pour le second principe de la thermodynamique. Dans le domaine de l'électrodynamique et de l'optique, la meilleure théorie dont nous disposons est celle de Lorentz. Mais Poincaré reproche à cette théorie de ne satisfaire que de manière approchée le principe de relativité et de violer le principe de réaction. Il pense que la future théorie sera probablement une version modifiée de la théorie de Lorentz. Enfin, Poincaré salue quelques grandes nouveautés expérimentales : l'effet Zeeman, que la théorie de Lorentz explique sans effort, et la découverte de nombreux "hôtes inattendus" : les rayons cathodiques, les rayons X, les rayons de l'uranium et du radium — découvertes qui ne menacent cependant pas l'unité de l'édifice théorique existant.⁴⁵

Le tome I des rapports continue avec la métrologie, socle de la physique dont les progrès étaient fréquemment exposés à la SFP (surtout par Guillaume). Le reste touche à la physique des milieux continus, dans des approches tantôt macroscopiques tantôt moléculaires. Les exposés des

⁴⁵ *RCIP*, vol. 1 ; H. Poincaré 1900, pp. 14, 27.

Français (Brillouin sur l'interdiffusion des gaz, Perrin sur l'osmose, Émile Amagat sur l'équation d'état des fluides) sont surtout expérimentaux même si leurs auteurs approuvent les approches théoriques moléculaires ; ceux des Néerlandais (Gustave van der Mensbrugge sur la capillarité et Diderik van der Waals sur les mélanges fluides) sont nettement plus théoriques et s'appuient sur des modèles moléculaires. L'Allemand Woldemar Voigt, grand spécialiste de la théorie de l'élasticité, fait partie du courant phénoménologique de Neumann et Kirchhoff, mais néanmoins prévoit que les théories moléculaires, convenablement modifiées pour inclure des moments directeurs des molécules, donneront une explication plus profonde de la cristallisation et de l'élasticité. Une voix s'élève contre les théories cinétiques moléculaires, celle de Gabriel Lippmann, grand spécialiste d'électrochimie formé à Berlin et inventeur du procédé de photographie en couleur qui porte son nom. Lippmann avance que la théorie cinétique implique un échauffement inductif des bords d'un trou percé dans une feuille d'or plongée dans un gaz magnétique comme l'oxygène, le tout étant soumis à un champ magnétique extérieur. Le second a de la thermodynamique est ainsi violé (car il interdit la formation spontanée d'un gradient de température). "Il semble donc," conclut Lippmann, "que les phénomènes de la chaleur ne se ramènent pas à une explication mécanique." Dans la discussion, Bernard Brunhes indique qu'on peut encore imaginer des moyens de concilier la mécanique avec la dissipation de l'énergie dans l'esprit des travaux de Marcel Brillouin sur la viscosité dans la théorie cinétique mais remercie tout de même Lippmann d'attirer la tension des physiciens sur "une grande question de philosophie scientifique."⁴⁶

Le tome II "Optique, électricité, magnétisme" commence par un exposé de Lord Kelvin sur un modèle du mouvement des atomes à travers un éther élastique. Ce modèle est sensé

⁴⁶ M. Brillouin 1900; Perrin 1900 ; Amagat 1900 ; van der Mensbrugge 1900 ; van der Waals 1900 ; Voigt 1900 ; Lippmann 1900 ; Brunhes, *RCIP* 4, p. 29. Sur la réception française des théories cinétiques, cf. *Principe* 2008.

justifier un éther stationnaire (à la Fresnel-Lorentz). Kelvin rappelle la contradiction avec le résultat de Michelson–Morley, et la manière dont FitzGerald et Lorentz ont évité cette contradiction. Plusieurs exposés allemands portent sur le rayonnement thermique et le rayonnement infrarouge, sujets encore assez peu abordés à la SFP. L'exposé le plus théorique, celui de Willy Wien, détaille les travaux de Kirchhoff, Boltzmann, Wien et Planck dans ce domaine. En particulier, Wien explique que Planck, en étudiant l'interaction entre rayonnement et petits résonateurs dans une cavité de parois réfléchissantes, croit avoir obtenu une démonstration de la loi exponentielle de Wien pour la distribution spectrale du rayonnement du corps noir, mais Wien doute de la nécessité des hypothèses sous-jacentes. Le Russe Pyotr Nikolayevich Lebedev expose ses expériences récentes sur la pression de radiation prédite par la théorie de Maxwell et ayant jusque-là résisté à toute vérification expérimentale. Les exposés de Cornu sur la vitesse de la lumière et de Henri Abraham sur le rapport des unités électrostatique et électromagnétique de charge (qui redonne cette vitesse selon la théorie de Maxwell) offrent un pont entre optique et électrodynamique. Viennent alors une série d'exposés sur les ondes hertziennes et les progrès récents dans leur application à la télégraphie sans fil. La structure atomique et moléculaire de la matière apparaît timidement dans un rapport assez touffu d'Emmanuel Carvallo sur les diverses théories de la dispersion de Cauchy à Helmholtz, beaucoup plus nettement dans le rapport de Svante Arrhenius sur les théories ioniques de l'électrolyse, centralement dans le rapport de Johannes Rydberg sur les spectres considérés comme révélateurs potentiels de la structure atomique, et enfin dans un exposé de Lucien Poincaré sur les théories de la pile électrique. Le cousin germain du grand Henri reconnaît l'importance et la solidité des résultats obtenus par la méthode thermodynamique mais pense que la curiosité scientifique doit nous porter naturellement vers les théories moléculaires. Celles-ci

ont une grande valeur heuristique, même si leurs hypothèses peuvent encore sembler aventureuses :⁴⁷

Il serait imprudent de chercher à prévoir le sort que l'avenir réserve aux théories qui reposent, comme celles de M. Arrhenius, de M. Ostwald et de M. Nernst, sur des hypothèses sur la constitution de la matière. Elles sont évidemment liées à ces hypothèses mêmes ; elles fournissent, toutefois, des relations qui sont parfois indépendantes des hypothèses elles-mêmes et elles constituent certainement le meilleur moyen de rattacher les uns aux autres des faits nombreux et importants qui étaient épars jusque-là.

...

Malgré ces réserves qui s'imposent, nous tenons, en terminant, à dire qu'à notre avis ces théories seront comptées certainement, dans l'histoire de la Science, parmi les plus ingénieuses et les plus fécondes qui aient été imaginées en ce siècle.

Le tome III est assez hétéroclite, comme l'indique le titre "Électro-optique et ionisation, applications, physique cosmique, physique biologique." Les trois derniers volets expriment la volonté des organisateurs de donner une conception ouverte de la physique rendant compte de ses succès industriels récents (en électrotechnique par exemple) et de ses applications géophysiques, astrophysiques, cosmologiques et biologiques. Le premier volet est consacré à la nouvelle microphysique théorique et expérimentale. Sur le plan théorique, Lorentz expose les diverses théories de l'effet Zeeman, en donnant bien sûr l'avantage à sa propre théorie électronique. C'est pour lui l'occasion de rendre compte de sa conception générale du couplage entre matière et éther stationnaire, même s'il n'aborde pas les conséquences importantes pour l'optique des corps en mouvement. Paul Drude applique sa théorie électronique des métaux à leur dispersion optique. J. J. Thomson affirme que les "corpuscules" sont des constituants universels de la matière et expose sa propre théorie de la conduction électrique et thermique métaux considérés comme gaz de "corpuscules." Becquerel et les Curie exposent leurs découvertes concernant la radioactivité. Villard relate ses expériences sur les rayons cathodiques, approuve la

⁴⁷ *RCIP*, vol. 2 ; Kelvin 1900 ; Wien 1900 ; Lebedev 1900 ; Cornu 1900 ; Abraham 1900 ; Carvallo 1900 ; Arrhenius 1900 ; Rydberg 1900 ; L. Poincaré 1900, pp. 420–421.

faible valeur donnée par J. J. Thomson et d'autres pour la charge massique des corpuscules cathodiques mais continue de croire qu'ils sont constitués de fines particules d'hydrogène.⁴⁸

En résumé, la SFP eut soin de ne pas limiter le Congrès de 1900 aux domaines expérimentaux dans lesquels les physiciens français excellaient et pouvaient discuter d'égal à égal avec leurs collègues étrangers. Elle invita des physiciens comme Lorentz, Drude et Wien dont les travaux étaient en passe de renouveler la physique théorique. Et elle fit venir des spécialistes de domaines expérimentaux (rayonnement thermique, infrarouges, spectres atomiques) encore peu explorés en France et importants par le rôle qu'ils allaient jouer dans la nouvelle physique quantique. Par la voix de Henri Poincaré, elle souligna l'importance de la physique théorique et les dangers d'un empirisme trop étroit et le rôle essentiel des hypothèses dans la construction théorique. En particulier, les organisateurs du congrès donnèrent une importance considérable aux hypothèses moléculaires, non seulement dans la version statique héritée de Laplace mais aussi dans les théories cinétiques plus récentes, et ce en dépit de la réticence de Lippmann.

Mécanique statistique et réalités des atomes

Malgré l'ouverture affichée lors du congrès de 1900, dans les années suivantes la SFP ne se soucie guère de théories cinétiques, de mécanique statistique, ou de théories du rayonnement thermique. Le tournant est l'invitation de Lorentz à prononcer la conférence de Pâques du 27 avril 1905 sur "La thermodynamique et les théories cinétiques." Lorentz y expose sa conviction que les théories cinétiques pourront un jour expliquer tous les phénomènes thermodynamiques qui semblent encore lui échapper, et il rappelle qu'elles seules permettent de prévoir certaines relations, par exemple

⁴⁸ *RCIP*, vol. 3 ; Lorentz 1900 ; Drude 1900 ; J. J. Thomson 1900 (rapport traduit par Langevin ; le résumé oral de Langevin est reproduit dans *RCIP* 4, p. 41) ; H. Becquerel 1900c ; P. et M. Curie 1900c ; Villard 1900b.

entre les coefficients de transport des gaz. Sa stratégie est de donner quelques exemples d'explication cinétique moléculaire de phénomènes, comme l'uniformité de la température d'un gaz dans un champ de pesanteur ou le gradient vertical de densité d'une solution dans un tel champ, semblent intuitivement contraires à la théorie cinétique. Il montre aussi que la théorie électronique des métaux, qui suppose l'existence d'un gaz d'électrons soumis aux lois de la théorie cinétique, permet de rendre compte d'une bonne partie de leurs propriétés électriques, thermoélectriques et optiques. En particulier, l'émissivité d'un métal à basse température donne, pour le rayonnement du corps noir aux grandes longueurs d'onde, un spectre conforme à la loi (de Rayleigh-Jeans) vérifiée par les spécialistes berlinois du spectre infra-rouge. Lorentz ne minimise pas pour autant les difficultés des théories cinétiques. Il admet qu'il n'existe toujours pas de dérivation satisfaisante du second principe de la thermodynamique sur cette base, que les violations de l'équipartition de l'énergie restent inexplicables, que les effets d'un champ magnétique sur un gaz d'électron ne sont pas conformes à l'expérience, et que, malgré la théorie de Planck dont il fait l'éloge, on ne comprend toujours pas pourquoi la densité spectrale du rayonnement d'effondre pour les petites longueurs d'onde.⁴⁹

La conférence de Lorentz coïncide avec l'influence croissante, dans la physique française et à la SFP, d'un groupe de physiciens favorables aux théories étrangères. Marcel Brillouin occupe alors la chaire de physique mathématique au Collège de France, depuis 1900 ; Pierre Curie a reçu le prix Nobel en 1903 avec sa femme et Henri Becquerel ; Langevin supplée Mascart au Collège de France depuis 1902, et il vient d'être nommé Professeur à l'ESPCI. Il est entouré d'un groupe d'étudiants travaillant sur la physique des ions ou sur les nouvelles théories dont il est le champion français. Dans cette même année 1905, il se fait remarquer par une

⁴⁹ Lorentz 1905.

nouvelle théorie du magnétisme, brièvement présentée le 20 janvier à la SFP et publiée un peu plus tard dans le *Journal de physique*. Suivant cette théorie, le diamagnétisme correspond à une modification inductive du courant électronique intramoléculaire lors de l'établissement du champ magnétique (en sus de la modification de fréquence qui donne l'effet Zeeman), et le paramagnétisme correspond à l'effet combiné du champ magnétique et des collisions moléculaires sur l'orientation moyenne des boucles de courant électronique. Ce dernier effet se calcule suivant la théorie de Boltzmann, en appliquant la distribution de Boltzmann aux moments moléculaires (considérés comme rigides) dans le champ magnétique. Langevin obtient ainsi des résultats conformes aux lois empiriques établies par son maître Pierre Curie.⁵⁰

Une autre preuve de l'importance accordée par la SFP à la théorie de Boltzmann est l'exposé de Poincaré à la séance du 6 juillet 1906. Ces "Réflexions sur la théorie cinétique des gaz" sont d'un niveau mathématique alors inédit à la SFP. Longtemps sceptique quant à la valeur de la théorie cinétique, Poincaré reconnaît désormais que ses difficultés ne sont qu'apparentes. Il raisonne par une succession de modèles simplifiés, dont le premier est le "problème des petites planètes" et montre que l'entropie grossière de Gibbs croît toujours, même quand les hypothèses trop restrictives de Gibbs sont relâchées.⁵¹

L'année suivante, à la conférence de Pâques du 4 avril 1907, l'Alsacien Pierre Weiss, alors professeur à l'École polytechnique de Zürich, présente son hypothèse du champ moléculaire pour une nouvelle théorie du ferromagnétisme. Dans sa théorie du paramagnétisme, Langevin avait indiqué que le ferromagnétisme résultait probablement d'une interaction entre les moments magnétiques de molécules voisines. L'idée de Weiss est de représenter cette interaction très

⁵⁰ Langevin 1905a, 1905d. Cf. Navarro et Olivella 1997.

⁵¹ Poincaré 1906. Plus tard dans l'année, le 16 novembre, Jacques Hadamard disserte sur les problèmes aux limites dans la théorie des équations aux dérivées partielles (Hadamard 1906). Un troisième mathématicien, Émile Borel interviendra plus tard à la SFP (Borel 1912, 1914).

simplement par un champ magnétique proportionnel à l'aimantation moyenne du milieu, ce qui permet de comprendre la possibilité d'aimantation d'un cristal en l'absence de champ externe. Weiss obtient ensuite l'effet d'un champ magnétique externe sur un corps ferromagnétique en le décomposant en microcristaux magnétisés. Cinq ans plus tard, le 4 janvier 1912, Weiss présentera à la SFP son concept du "magnéton" comme mesure de tout moment magnétique, après avoir observé la commensurabilité des aimantations de corps ferromagnétiques saturés à basse température dans le laboratoire de Heike Kamerlingh Onnes à Leiden.⁵²

Un autre aspect de la théorie cinétique alors abordé à la SFP à la même époque est la prédiction de fluctuations observables pour des particules en suspension dans un fluide. Le 15 mai 1908, le physico-chimiste et physiologue franco-russe Victor Henri présente une étude cinématographique du mouvement brownien. Il décrit les trajectoires en zigzag des particules d'une émulsion de latex. Comme il est au courant des théories d'Einstein, Smoluchowski et Langevin (de la même année), il calcule la moyenne quadratique moyenne de la distance parcourue par les particules de latex dans un temps donné et trouve une valeur proportionnelle au temps, comme le veut la théorie, mais quatre fois trop grande. Il ne remet pas en question le principe général des calculs théoriques mais plutôt l'usage qu'a fait Einstein de la formule de Stokes (pour le freinage visqueux des particules) à une échelle où elle n'est peut-être pas valide.⁵³

Comme le savait Henri, Jean Perrin avait déjà travaillé sur les suspensions colloïdales, afin de vérifier le gradient vertical de densité prévu par la théorie cinétique et afin d'en tirer une valeur du nombre d'Avogadro. Lors de sa conférence de Pâques le 15 avril 1909, Perrin rappelle l'histoire du mouvement brownien et résume ses expériences sur le gradient vertical d'une émulsion de sphérules de gomme-gutte ou de mastic. Selon lui, ces expériences vérifient non

⁵² Weiss 1907, 1912. Sur les théories de Weiss et sur les vicissitudes de son magnéton, cf. Quédec 1988.

⁵³ Henri 1908. Sur les études expérimentales du mouvement brownien, cf. Nye 1972 ; Bigg 2008.

seulement la théorie cinétique du mouvement brownien mais aussi l'hypothèse moléculaire, sans laquelle ce mouvement et le gradient de densité qui en résulte ne seraient point concevables. Les résultats de Henri, avoue-t-il, l'ont fait douter un moment de la théorie d'Einstein. Mais reprenant avec son "jeune camarade" Joseph Ulysse Chaudesaigues les mesures de déplacement quadratique sur des sphérules de taille bien contrôlée, il a pu confirmer la formule d'Einstein. Enfin, Perrin rappelle les divers moyens connus d'accéder au nombre d'Avogadro, se félicite de l'assez bonne convergence des valeurs trouvées et y voit "le plus solide fondement de ce qu'on pourrait appeler le PRINCIPE DE RÉALITÉ MOLÉCULAIRE."⁵⁴

Le rôle des expériences de Perrin dans la confirmation de l'hypothèse moléculaire a souvent été exagéré. Comme on l'a vu dans le cadre de la SFP, pour beaucoup de physiciens cette hypothèse était déjà devenue réalité dans la nouvelle physique des ions et électrons apparue à la fin du siècle précédent. En France, la physique des ions gazeux ne cessait de s'enrichir grâce aux efforts de Langevin et de ses disciples. Les spécialistes de mécanique physique comme Amagat s'autorisaient de plus en plus à spéculer sur les forces de van der Waals. Mais les expériences de Perrin importèrent d'une autre manière : en donnant une preuve expérimentale solide des fluctuations, qui comme Boltzmann l'avait prévu, devaient permettre de trancher entre la thermodynamique ordinaire et la théorie cinétique. Sur le plan théorique, l'autorité de Lorentz et celle de Poincaré laissait espérer que toutes les difficultés conceptuelles de cette théorie seraient bientôt résolues.⁵⁵

4. La théorie des quanta

⁵⁴ Perrin 1909, p. 188 (avec ses propres capitales). Voir aussi Perrin 1911.

⁵⁵ Amagat 1909, par exemple. Sur Boltzmann et les fluctuations, cf. Darrigol 2018, pp. 522–526.

Dans la première décennie du XX^e siècle, la théorie de Planck resta largement invisible à la SFP, mis à part la conférence de Lorentz de Pâques 1905. Mais il ne faut pas voir là une exception française. De manière générale, on ne citait le travail de Planck que pour une formule bien vérifiée de la densité spectrale du rayonnement du corps noir et l'on ignorait poliment l'introduction de quanta d'énergie dans la démonstration. De même, l'article d'Einstein de 1905 sur les quanta lumineux fut largement ignoré jusqu'à ce que Lorentz, en 1908, donnât sa propre démonstration de l'impossibilité d'expliquer le spectre du rayonnement du corps noir sans admettre un élément fondamentalement nouveau de discontinuité dans la dynamique sous-jacente. Un autre travail d'Einstein de 1906, donnant une théorie quantique des chaleurs spécifiques et résolvant ainsi le vieux paradoxe de l'équipartition de l'énergie, attira l'attention de Walther Nernst, qui à partir de 1909 s'employa à vérifier les prédictions d'Einstein pour la diminution des chaleurs spécifiques à basse température. Nernst exposa ces travaux à la SFP lors de sa conférence de Pâques du 1^{er} avril 1910, dans le cadre de son programme plus ancien d'application de son troisième principe de la thermodynamique. Dans ce texte il cite le "travail très remarquable" d'Einstein, souligne la simplicité de sa formule pour les chaleurs spécifiques des solides, et affirme en avoir vérifié une variante. Dans la même année, Nernst est nommé membre honoraire de la SFP.⁵⁶

Lors de la séance du 3 décembre 1909, Edmond Bauer et Marcel Moulin, deux étudiants de Langevin, présentent une nouvelle détermination expérimentale de la constante de la loi de Stefan pour l'énergie totale du rayonnement du corps noir. À cette occasion, ils indiquent que Planck a établi une relation entre cette constante et d'autres constantes fondamentales dans une théorie analogue à la théorie cinétique des gaz mais pourtant bien différente :

⁵⁶ Einstein 1905, 1907 ; Nernst 1910.

Dans la forme définitive que [M. Planck] a donné à sa théorie, il a introduit une nouvelle hypothèse, un peu arbitraire, qui, si elle se vérifiait dans toutes ses conséquences, nous forcerait à modifier complètement nos idées sur l'éther et sur la propagation des actions électromagnétiques. M. Planck suppose que la structure de l'énergie rayonnante est discontinue et que les différents résonateurs qui constituent la matière émettent et reçoivent des atomes d'énergie, dont la grandeur ε est d'ailleurs proportionnelle à la fréquence ν du résonateur qui les contient : $\varepsilon = h\nu$, h étant une constante universelle.

En réalité, seul Einstein envisageait une structure discontinue de l'énergie rayonnante à cette époque. Planck n'admettait rien de tel. La conférence de Pâques, "Énergie et température," qu'il prononce le 21 avril 1911 pour la SFP, lui donne l'occasion de s'expliquer à ce sujet. Autrefois ennemi des théories cinétiques et atomistiques, il reconnaît maintenant que seules celles-ci sont en mesure de déterminer le rapport entre les constantes caractéristiques (par exemple les chaleurs spécifiques) de divers corps. Mais, rappelle-t-il, l'équipartition de l'énergie qu'implique la théorie de Boltzmann se trouve violée pour les molécules polyatomiques, pour les métaux, et pour le rayonnement du corps noir. Selon la théorie de Boltzmann, l'entropie est le logarithme d'une probabilité. Cette probabilité, nous dit vaguement Boltzmann, est une fonction de l'énergie de l'entité considérée. Pour obtenir la valeur empiriquement correcte de cette probabilité, il faut abandonner la dynamique hamiltonienne pour le mouvement interne de cette entité et il faut au contraire supposer que son énergie ne peut varier que de manière discontinue, par quanta $\varepsilon = h\nu$ dans le cas d'un oscillateur harmonique de fréquence ν . C'est ce qu'a fait Einstein dans sa théorie des chaleurs spécifiques des solides, théorie vérifiée par Nernst. Mais, Planck poursuit, cette hypothèse semble trop audacieuse car on ne peut comprendre comment une onde électromagnétique continûment distribuée dans l'espace pourrait causer de tels sauts d'énergie. Il vaut mieux supposer que seule l'émission de rayonnement est discontinue.⁵⁷

⁵⁷ Bauer et Moulin 1909, 1910 (p. 60) ; Planck 1911. Avant Bauer, quelques autres Français (Guillaume, Bouty et Charles Féry) avaient expérimenté sur le rayonnement thermique. Sur la deuxième théorie de Planck, cf. Kuhn 1978, chap. 10. Sur la physique quantique en France au début du XX^e siècle, cf. Bustamante 2002 ; Kojima 2004. Le cours

Comme on le sait, le Conseil Solvay de 1911, tenu à Bruxelles du 30 octobre au 3 novembre, a joué un rôle important dans la formation d'un consensus en faveur de l'existence d'une discontinuité quantique en physique. Parmi l'élite internationale rassemblée à cette occasion se trouvaient Marcel Brillouin, Marie Curie, Jean Perrin, Henri Poincaré, et les deux secrétaires Paul Langevin et Maurice de Broglie (Pierre Curie et Henri Becquerel n'étaient plus de ce monde), tous représentants du courant progressiste de la SFP. Lors de la séance de la SFP du 8 décembre 1911, Bauer expose "la structure discontinue de l'énergie." La première partie de sa thèse, dirigée par Langevin, donnait en effet un exposé détaillé et compétent des théories du corps noir et abordait les divers arguments en faveur de la discontinuité quantique, y compris celui présenté par Poincaré au Conseil Solvay (sur l'impossibilité mathématique de reproduire la loi du corps noir en appliquant la loi canonique de Gibbs à un ensemble d'oscillateurs sans admettre un seuil d'excitation de ces oscillateurs). Dans le résumé de son exposé à la SFP on trouve à nouveau l'affirmation d'une structure discontinue de l'énergie rayonnante, à quelques nuances près :

Pour interpréter ces lois nouvelles, il semble nécessaire de supposer avec Max Planck et Einstein que l'énergie rayonnante a une structure discontinue, et qu'elle est constituée de grains dont la grandeur est inversement proportionnelle à la longueur d'onde.

On ne peut pas dire encore si cette discontinuité est une propriété intrinsèque du rayonnement ou si elle règle simplement les échanges d'énergie entre la matière et l'éther.

Il semble cependant que cette dernière hypothèse est la plus raisonnable, mais on n'a pas encore trouvé la mécanique nouvelle qui s'appliquera aux phénomènes intra-atomiques et aux mouvements dont l'accélération est très grande.

de Langevin au Collège de France pour 1912–1913 portait sur la théorie du rayonnement (du corps noir) et ses difficultés : cf. Bustamante 2019.

L'année suivante, Lorentz enseignera les méthodes statistiques en thermodynamique au Collège de France, sachant que l'importance de ces méthodes venait de croître considérablement par leur application à la nouvelle physique des quanta.⁵⁸

A cette époque, les travaux de Bauer et Poincaré sur la nouvelle physique quantique, les travaux des proches de Langevin sur les ions, ceux de Perrin concernant la réalité moléculaire, ceux de Madame Curie et de ses collaborateurs sur la radioactivité, et ceux de Langevin et Weiss sur le magnétisme sont considérés à la SFP comme procédant d'un même mouvement progressiste. Pendant l'hiver et le printemps 1911–1912, la Société organise une série de conférences par ces hérauts de la nouvelle physique et elle les publie en 1913 dans sa série de Mémoires relatifs à la physique. Lucien Poincaré s'en félicite lors de la séance du 19 janvier 1912 :

Cet hiver, nous avons inauguré cette magnifique série de conférences sur les idées actuelles relatives à la constitution de la matière, qui se poursuivent avec un succès toujours croissant. Ces Conférences vont être réunies en un volume ... qui constituera comme un prolongement des rapports du Congrès de 1900 et contribuera, sans aucun doute, à la gloire de la Société et au progrès de la science qui nous est chère.

Lors de la même séance, Einstein est élu membre (non résidant) du conseil scientifique de la SFP. Le 3 mai 1912, Marcel Brillouin informe la SFP du contenu de ses leçons au Collège de France sur les chaleurs spécifiques des solides selon Einstein et ses successeurs, et il indique avoir développé une théorie semblable à celle de Max Born et Theodore von Kármán. Le 27 mars 1913, Einstein prononce une conférence de Pâques sur "les bases thermodynamiques de la loi des équivalents photochimiques." Comme le rappelle Guillaume dans ses commentaires, Einstein a d'abord obtenu cette loi en admettant qu'une action photochimique élémentaire implique le quantum $h\nu$ pour une lumière de fréquence ν . Mais, confronté aux paradoxes des

⁵⁸ De Broglie et Langevin 1912 (Conseil Solvay) ; Bauer 1911 (p. 82), 1912 ; Lorentz 1912. Sur Langevin et le Conseil Solvay, cf. Bustamante 2011.

quanta lumineux, il essaye alors de retrouver les prédictions de la théorie quantique par des moyens purement thermodynamiques.⁵⁹

Dans son allocution de président sortant prononcée le 13 janvier 1914, Guillaume s'avoue un peu perdu par les chamboulements successifs de la physique depuis la fondation de la SFP. Il souligne le rôle de la Société dans la physique "d'avant-garde" :

Dans tout ce mouvement de la science physique, dont je viens de tenter une esquisse rapide et bien imparfaite, notre Société a joué un rôle sans cesse actif. Non seulement elle a eu dans ses séances ordinaires, la primeur de plus d'une découverte fondamentale ; mais encore, elle a cherché, dans des séances systématiquement organisées, à dresser un tableau de ce qu'on pourrait appeler l'état d'esprit des physiciens d'avant-garde.

Guillaume fait ici allusion au cycle de conférence organisé par la SFP en 1911–1912 et à un cycle analogue commencé l'hiver suivant, comprenant une conférence de Langevin sur "la physique du discontinu" et une conférence de Maurice de Broglie sur les rayons X. Exploitant la découverte de la diffraction de ces rayons par Max Laue en 1912, de Broglie allait devenir un grand spécialiste de la spectrographie des rayons X, source riche d'information pour la théorie atomique. Dès 1913, il insistait sur la nature paradoxale de ces rayons tantôt ondes périodiques dans les expériences de diffraction, tantôt corpuscules dans leur absorption par la matière. Ses expériences sur l'effet photo-électrique des rayons X, rapportées à la SFP le 4 février 1921, démontrèrent la nécessité de la quantification du rayonnement deux ans avant l'effet Compton. A la suite de cette dernière communication, on peut lire :⁶⁰

M. Langevin souligne en quelques mots le caractère direct de l'argument apporté par M. de Broglie en faveur de l'émission des corpuscules avec une énergie égale à $h\nu$ après la sortie du champ atomique ; les autres indications apportées jusqu'ici pouvaient prêter à des interprétations diverses [alors que les vérifications antérieures de la relation d'Einstein dans le domaine UV pouvaient s'expliquer sans les quanta lumineux].

⁵⁹ *IMCM* ; L. Poincaré 1912, p. 7 ; M. Brillouin 1912 ; Einstein 1913 ; Guillaume, *PVSFP* (4 avril 1913), p. 38. Sur les tentatives d'Einstein de contourner les quanta à cette époque, cf. Darrigol 2014b.

⁶⁰ Guillaume 1914, p. 3 ; *IMCM* ; *PPM* ; Langevin 1914 ; M. de Broglie 1913, 1914a, 1914b, 1914c, 1921a, 1921b, 1922a, 1922b ; Langevin, *PVSFP* (1914), pp. 10–11. Sur les travaux de M. de Broglie concernant les rayons X, cf. Wheaton 1983, Parts 4–5.

La théorie atomique de Niels Bohr de 1913 et la théorie d'Arnold Sommerfeld de 1916–17 ne seront abordées à la SFP qu'à partir de 1919. La guerre explique facilement ce silence. Les activités de la Société sont interrompues pendant quelques mois en 1914 et ne reprendront que sous une forme réduite, avec une seule communication par séance, souvent sur un sujet d'intérêt militaire. Les deux meilleurs spécialistes français des théories quantiques, Bauer et Langevin, ont d'autres préoccupations. Bauer est blessé et il est fait prisonnier en Allemagne ; Langevin travaille sur le sonar. À l'issue de la guerre, dans la séance de la SFP du 7 mars 1919, Bauer et Auguste Piccard rapportent des mesures de la susceptibilité des gaz paramagnétiques qui semblent contredire l'hypothèse du magnéton de Weiss. Dans la séance suivante, Langevin pense pouvoir lever la contradiction grâce à une version quantique de sa théorie du paramagnétisme. À cette occasion, il résume les "résultats tout à fait remarquables" obtenus par Bohr et Sommerfeld dans leur théorie des spectres atomiques et conclut :

Tout ceci, joint aux résultats plus anciens (spectre du corps noir, vitesses des émissions photo-électriques, chaleurs spécifiques des solides et des gaz), impose l'obligation de poursuivre dans toutes les directions les conséquences d'une hypothèse si féconde, en dépit ou peut-être à cause des obscurités qui subsistent à sa base.

À la suite de la communication de Langevin, Eugène Bloch montre que la condition de quantification de Sommerfeld peut servir la théorie quantique des chaleurs spécifiques. L'année suivante, son frère Léon publie — non sans rappeler que pendant la guerre Sommerfeld a signé une lettre recommandant le boycott de la science étrangère — un compte-rendu enthousiaste de *Atombau und Spektrallinien* dans le nouveau *Journal de physique* absorbant *Le radium* (journal créé par le physicien Jacques Danne et l'ingénieur Henri Farjas en 1904) et repris par la SFP sous la direction de Langevin.⁶¹

⁶¹ Bauer et Piccard 1919 ; Langevin 1919a, p. 19 ; E. Bloch 1919 ; L. Bloch 1920.

Les recherches de Maurice de Broglie sur les spectres des rayons X font aussi intervenir la théorie de Bohr-Sommerfeld. Maurice sollicite l'aide de son jeune frère Louis, qui présente, dans la séance de la SFP du 15 février 1921, ses prédictions théoriques pour l'absorption des rayons X. Le 21 mai, Maurice utilise les basses couches de l'atome de Bohr (K, L, ...) pour rendre compte de ses nouveaux "spectres corpusculaires" pour l'énergie des électrons éjectés d'un atome par les rayons X. À partir de la fin de 1921, la SFP organise des "conférences-rapports de documentation sur la physique." Les trois premières, prononcées par Maurice de Broglie, portent sur les rayons X. Dans les trois suivantes (janvier 1922), Léon Brillouin, fils de Maurice et auteur d'une thèse (1920) sur la théorie quantique des solides sous la direction de Langevin, présente la théorie quantique, ses débuts, la théorie de Bohr-Sommerfeld et les développements récents à l'aide du principe adiabatique de Paul Ehrenfest. Grâce à la SFP et aux efforts de Langevin, les physiciens français pouvaient donc se tenir au courant des progrès de la nouvelle théorie quantique et ils purent même apporter quelques contributions originales dans les années suivantes.⁶²

5. La Relativité

La relativité et les théories qui ont préparé son avènement apparaissent très peu à la SFP dans l'avant-guerre. Certes Lorentz a eu l'occasion, en 1900, de présenter les principes de sa théorie électromagnétique lors du congrès international organisé par la SFP. Mais les quelques communications de la SFP concernant l'optique ou l'électrodynamique des corps en mouvement (le terreau de la relativité) sont étrangères, voire hostiles à cette théorie. Il peut s'agir de l'induction unipolaire et de la vieille question de l'entraînement des lignes de force lors de la rotation d'un aimant autour de son axe, ou d'une remise en question des effets magnétiques du courant de

⁶² L. de Broglie 1921 ; M. de Broglie 1921b, 1922a, 1922b ; L. Brillouin 1922 ; *PVSFP* (1921), pp. 40–41, pour l'annonce des conférences-rapports.

convection dans les expériences de Crémieu, ou encore, dans une communication de Sagnac du 17 novembre 1899, d'une théorie élémentaire et intuitive de l'entraînement des ondes lumineuses par un milieu transparent en mouvement. Les quelques travaux théoriques français se rapportant à la théorie de Lorentz, ceux de Poincaré, d'Alfred Liénard et de Langevin ne sont pas rapportés à la SFP. En compensation, l'ouvrage *Les quantités élémentaires d'électricité* publié par la SFP en 1905 reproduit les mémoires de Lorentz, Larmor, Poincaré, Wiechert, Wien, Max Abraham et Langevin sur les nouvelles théories de l'électron doué d'une inertie électromagnétique. Le nom d'Einstein n'apparaît nulle part dans ce recueil, parut trop tôt pour cela. En revanche la théorie de la relativité apparaît brièvement sous la forme de la "dynamique de l'électron" annoncée par Poincaré dans les *Comptes rendus* quelques semaines avant l'article d'Einstein sur la relativité.⁶³

À l'exception de Planck et de ses disciples, aucun physicien important ne s'intéresse à la relativité d'Einstein dans les trois années suivantes. En 1908, la contribution magistrale de Hermann Minkowski et de nouvelles expériences d'Alfred Bucherer favorisant la dynamique relativiste de l'électron persuadent les experts allemands de la supériorité de la théorie d'Einstein. Mais la SFP reste à l'écart. Lors de la séance du 19 mai 1911, l'ingénieur naval Maurice-Ernest Lémery affirme que les transformations de Lorentz impliquent une dilatation de la période d'une source lumineuse monochromatique quand celle-ci est en mouvement, sans bien préciser les conditions d'observation et sans aucune référence à la théorie d'Einstein. Le 17 novembre 1911, dans la dernière partie d'une conférence intitulée "Les grains d'électricité et la dynamique électromagnétique," Langevin décrit les diverses théories de l'électron d'Abraham, Lorentz et Poincaré et affirme que "la nouvelle Dynamique ne peut être développée de manière cohérente qu'en se plaçant au point de vue du principe de relativité," favorisant ainsi les modèles de Lorentz

⁶³ Sagnac 1899d, 1900 ; *QEE* ; H. Poincaré 1905a, 1905b. Sur la réception française de la Relativité, cf. Paty 1987 ; Walter 2011.

et de Poincaré. Mais Einstein n'est pas nommé, bien que la Société ait plusieurs fois abordé, depuis 1909, les travaux d'Einstein concernant le mouvement brownien et les quanta d'énergie.⁶⁴

Le mémoire d'Einstein de 1905 sur l'électrodynamique des corps en mouvements et la déduction un peu plus tardive de l'inertie de l'énergie sont cités pour la première fois à la SFP le 20 décembre 1912, par le curieux Lémeray. Celui-ci conteste la déduction d'Einstein, affirmant que l'énergie est un invariant relativiste et que par conséquent la masse d'un corps ne saurait diminuer lors de l'émission d'énergie rayonnante. Mais le 26 mars 1913, probablement en la présence d'Einstein (qui parlera le lendemain sur les équivalents photochimiques), Langevin prononce une conférence de Pâques intitulée "L'inertie de l'énergie et ses conséquences." Il rappelle d'abord la notion d'inertie électromagnétique et les théories de l'électron fondées sur cette notion. Il en résulte, dans le modèle de Poincaré, que l'énergie d'un électron au repos est le produit de sa masse par le carré de la vitesse de la lumière. Langevin affirme que dès 1906 et indépendamment d'Einstein il a enseigné dans son cours au Collège de France que l'inertie d'un corps dépendait plus généralement de son contenu en énergie, sur la base de deux considérations: d'abord une cavité formée de deux miroirs parallèles et contenant des ondes planes parallèles aux miroir acquière une masse proportionnelle à son énergie électromagnétique, et une source lumineuse émettant une quantité égale d'énergie dans deux directions opposées perd une masse proportionnelle à l'énergie émise. Comme Einstein, Langevin obtient ce résultat en comparant les processus dans deux référentiels, l'un lié à la source (ou à la cavité dans le premier cas) et un autre dans laquelle la source a un mouvement uniforme. Contrairement à Einstein, il compare les quantités de mouvement et non pas les énergies dans les deux référentiels, et il n'a donc besoin que

⁶⁴ Lémeray 1911 ; Langevin [1911], *PVSFP* (1911), p. 80. Langevin avait pourtant traduit un mémoire important de Minkowski et il avait déjà enseigné (en 1910–1911) la théorie de la relativité au Collège de France : voir Paty 1987. Sur l'impact des travaux de Minkowski, cf. Walter 2010.

des transformations de Lorentz au premier ordre pour le champ électromagnétique et la quantité de mouvement associée. Langevin indique aussi que le principe de relativité, combiné avec l'invariance de la vitesse de la lumière, implique de nouveaux concepts d'espace et de temps, sans détailler les raisonnements d'Einstein.⁶⁵

La relativité ne reviendra à la SFP qu'à la fin de 1919, en réaction à la vérification spectaculaire d'une des prédictions de la relativité générale : la déviation gravitationnelle de la lumière. Le résultat des deux expéditions organisées par Arthur Eddington pour tester cette prédiction lors de l'éclipse solaire du 29 mai, annoncé en novembre, fit immédiatement sensation dans la presse internationale. Le 19 décembre, Langevin communique les "vérifications expérimentales récentes du principe de relativité" à la SFP. Dans sa conférence du 6 février 1920 sur "les aspects successifs du principe de relativité," il décrit d'abord comment le principe de relativité restreinte a conduit Einstein à repenser les concepts d'espace et de temps de manière conforme au groupe de Lorentz, comment la nouvelle loi d'addition des vitesses explique l'entraînement partiel des ondes lumineuses, et comment une nouvelle dynamique relativiste est apparue. Comme confirmations de cette dynamique, il cite les expériences récentes de Charles-Eugène Guye sur la déviation des rayons cathodiques ainsi que les prédictions de Sommerfeld pour la structure fine de l'hydrogène et pour la série K des spectres X des atomes. Puis il introduit la relativité générale comme un développement de l'idée que toute énergie est pesante en même temps qu'inerte. Le principe d'équivalence, illustré par le boulet de Jules Verne, conduit ensuite à une validité locale de la métrique de Minkowski. Par analogie avec la théorie des surfaces de Gauss, la théorie d'Einstein suppose une variété riemannienne de signature minkowskienne. Une

⁶⁵ Einstein 1905b ; Lémeray 1912 ; Langevin 1913. En 1915, dans ses leçons de Marseille sur la théorie de la Relativité en bonne partie fondées sur l'ouvrage de Laue, Lémeray approuvera l'inertie de l'énergie. Sur les premières dérivations de l'inertie de l'énergie, cf. Darrigol 2000b. Sur Langevin et la Relativité, cf. Cuvaj 1970, 1971 ; Paty 1999, 2002 ; Comte 2002.

géodésique de cette variété représente la trajectoire d'une particule dans le champ gravitationnel défini par les coefficients de la métrique. Les équations de ce champ s'obtiennent comme une généralisation covariante de la relation entre potentiel gravitationnel et densité de masse dans la théorie de Newton. La solution de symétrie sphérique dans le vide (avec masse centrale) conduit à des géodésiques correspondant au mouvement de Kepler corrigé d'une précession en accord avec l'anomalie connue dans la précession de Mercure. Les géodésiques de genre lumière impliquent une déviation des rayons lumineux par la masse centrale, vérifiée récemment par Eddington et ses collaborateurs.⁶⁶

Cet exposé de Langevin témoigne d'une bonne compréhension de la relativité générale. Depuis 1910, il est le défenseur le plus compétent de la théorie de la relativité en France. Il s'adresse à un public assez large mais aussi aux spécialistes soucieux d'apprendre la théorie, comme dans ses trois conférences-rapports de février 1922. Au printemps de la même année, il invite Einstein pour une série de conférences-débats au Collège de France (une invitation antérieure, en 1914, avait dû être annulée en raison de la guerre). En raison du boycott des scientifiques allemands, le bureau de la SFP vote contre la suggestion de Langevin d'une réception d'Einstein dans les locaux de la Société. Il est peu vraisemblable que ce vote ait été motivé par une hostilité des autorités de la SFP à la relativité. Certes, la Société avait donné la parole, dans la séance du 18 juin 1920 et pour une conférence de Pâques le 30 mars 1921, à un adversaire de cette théorie : Georges Sagnac. Mais dans la séance du 15 avril, le grand mathématicien Émile Borel exprimait son admiration pour la théorie et pour l'exposé que Langevin en avait fait. Dans les séances du 3 décembre 1920 et du 17 juin 1921, Alfred Pérot rapportait une confirmation du décalage gravitationnel de raies spectrales solaires. Le 16 décembre, Langevin revenait sur "la dynamique de la relativité" pour la

⁶⁶ Langevin 1919b, 1920.

section de Strasbourg de la SFP (René Thiry, Maître de conférences à l'Université de Strasbourg, s'y exprimera le mois suivant sur la cosmologie relativiste d'Einstein). En 1922, le président de la Société (Henri Abraham) et deux des quatre autres membres du bureau de la Société (Léon Brillouin, Louis Dunoyer) sont des proches de Langevin, et Abraham assiste aux conférences d'Einstein au Collège de France ; le vice-président, le mathématicien Émile Picard, publie un ouvrage sur la relativité dans la même année.⁶⁷

Conclusions

La SFP a vigoureusement soutenu la microphysique expérimentale née dans la dernière décennie du XIX^e siècle. Les ténors français de cette nouvelle physique, principalement Jean Perrin, Henri Becquerel, Pierre et Marie Curie, Georges Sagnac, Paul Langevin et Maurice de Broglie s'y sont souvent exprimés et lui ont parfois réservé la primeur de leurs découvertes. Même si les *Comptes rendus* répercutaient toute innovation importante, un exposé à la SFP touchait un public plus vaste et plus divers, il pouvait s'accompagner d'édifiantes expériences, et il était fréquemment suivi d'une discussion. De plus, la SFP organisa des séries de conférences et publia plusieurs ouvrages sur cette nouvelle physique. Elle tenait son auditoire au courant des principaux travaux étrangers, et elle cherchait à s'associer des spécialistes de tout horizon. C'est en partie grâce à elle que la France a pu occuper une position avantageuse dans cette physique des radiations pendant toute la période qui nous intéresse.

⁶⁷ Langevin 1922 (titre seulement) ; Sagnac 1920, 1921 ; Borel 1920 ; Pérot 1920, 1921 ; Langevin 1921 ; Thiry 1922 ; Picard 1922. Pour le vote du bureau de la SFP (22 mars 1922) contre une réception d'Einstein, voir Netter 1973, p. 3. Pour la composition du bureau de 1922, cf. *BSFP* (1922), p. 7. L'opposition conservatrice était plus nourrie à l'Académie des Sciences où à la Sorbonne qu'à la SFP. Sur cette opposition et plus généralement sur la visite d'Einstein à Paris, cf. Biézunsky 1991. Sur l'attitude de Sagnac, cf. Darrigol 2014, pp. 825–829,

L'enthousiasme français pour cette nouvelle physique a parfois tourné à l'imprudence, et il a engendré des entités de courte durée de vie comme les rayons N de Blondlot ou les rayons magnétocathodiques de Villard. La SFP s'est ouverte à de telles propositions, mais pas plus que l'Académie des sciences. Contrairement à cette dernière, elle n'a jamais cherché à étouffer les critiques adressées à leurs auteurs.⁶⁸

La physique théorique était relativement peu abordée dans les séances de la SFP. En compensation, la Société organisa un congrès international, de multiples conférences et des publications (les fameux *Mémoires relatifs*) donnant une part importante à la théorie. À partir de 1919, les exposés théoriques devinrent plus fréquents lors des séances de la Société. Elle donna même la parole à des mathématiciens comme Poincaré, Hadamard, ou Borel. Elle collaborait étroitement avec le *Journal de physique*, qui n'hésitait pas à publier de longs mémoires théoriques. En 1920, la SFP elle devint propriétaire de ce journal et Langevin en prit la direction. Les circonstances n'étaient donc pas trop défavorables pour que les nouvelles théories étrangères, la mécanique statistique, la théorie quantique et la théorie de la relativité trouvent une place en France. Langevin et ses disciples présentèrent les premières notions quantiques au public de la SFP à partir de 1910–1911, avec un retard assez normal compte-tenu de la réception lente et hésitante des idées de Planck et d'Einstein même en Allemagne. Pour ce qui est de la relativité, les premiers exposés à la SFP datent de 1913, quatre ou cinq ans après l'adoption de cette théorie par les spécialistes allemands de la théorie de l'électron. Curieusement, c'est dans la version Einsteinienne et pas du tout dans la version Poincaréenne que le public de la SFP connut la théorie. La guerre interrompit cette première diffusion. L'intérêt pour la théorie d'Einstein resurgit en 1919 en conséquence des expéditions d'Eddington confirmant la courbure gravitationnelle des rayons

⁶⁸ Je fais ici allusion au rejet par Mascart d'une critique de Blondlot adressée aux *Comptes-rendus* (voir plus haut, note 35)

lumineux lors d'une éclipse solaire. La SFP joua alors, sous l'impulsion de Langevin, un rôle important dans la diffusion de la théorie d'Einstein, même si elle donna aussi la parole à un anti-relativiste notoire : Georges Sagnac. Qu'elle ait refusé de recevoir Einstein à l'occasion de sa visite à Paris au printemps 1922 ne signifie nullement qu'elle sous-estimait l'importance de ses théories.

L'histoire de la SFP nous conduit ainsi à rejeter l'image d'une France trop sûre d'elle et fermée aux idées étrangères, image déjà mise à mal par des études ciblées de réception.⁶⁹ Il reste vrai que les Français, aussi bien informés qu'ils fussent des nouvelles théories atomistiques, quantiques et relativistes grâce aux efforts des membres progressistes de la SFP, furent longtemps spectateurs plutôt qu'acteurs dans ce domaine. La seule exception importante est sans doute la théorie du magnétisme de Langevin, suivie de celle de Pierre Weiss. Il faut aussi noter que Maurice de Broglie développa une activité expérimentale du tout premier ordre en relation avec les nouvelles théories quantiques et atomiques. Il est en fait le premier, avant Compton, à avoir démontré la nécessité expérimentale des quanta lumineux dans l'effet photo-électrique (des rayons X). Son jeune frère Louis se chargeait d'interpréter ses spectres de rayons X à l'aide de la théorie de Bohr-Sommerfeld. Ce n'est pas par hasard que Louis de Broglie et un peu plus tard Léon Brillouin purent, dans les années 1920, contribuer de manière essentielle à la nouvelle mécanique quantique ou ondulatoire : ils avaient pu s'imprégner de la physique d'avant-garde promue par la SFP et son membre alors le plus influent, Paul Langevin.

Abréviations

⁶⁹ Parmi ces études, citons Príncipe 2008 ; Lelong 2005 ; Bustamante 2002 ; Paty 1987.

- BSFP* Société française de physique, *bulletin* [bimensuel, publié à partir de 1922 en appendice à *JPR*]
- BSSFP* *Bulletin des séances de la Société française de physique* [bimensuel, 1902–1910]
- CR* Académie des Sciences, *comptes-rendus hebdomadaires des séances*
- IMCM* *Les idées modernes sur la constitution de la matière : conférences faites en 1912 par E. Bauer, A. Blanc, E. Bloch, Mme P. Curie, A. Debierne, L. Dunoyer, P. Langevin, J. Perrin, H. Poincaré, P. Weiss* [sous les auspices de la SFP]. Paris: Gauthier-Villars, 1913.
- JP* *Journal de physique théorique et appliquée* [1872–1919]
- JPR* *Journal de physique et le radium*
- PPM* *Les progrès de la physique moléculaire : conférences faites en 1913–1914 par Mme P. Curie, J. Becquerel, M. de Broglie, A. Cotton, Ch. Fabry, P. Langevin, Ch. Mauguin, H. Moutton* [sous les auspices de la SFP]. Paris: Gauthier-Villars, 1914.
- PVSFP* Société française de physique, *Procès-verbaux et résumés des communications* [1911–1921]
- QEE* *Les quantités élémentaires d'électricité : ions, électrons et corpuscules*. 2 vols. Collection de mémoires publiés par Henri Abraham et Paul Langevin sous les auspices de la SFP. Paris : Gauthier-Villars, 1905.
- RCIP* *Rapports présentés au Congrès international de physique réuni à Paris en 1900 sous les auspices de la Société française de physique, rassemblés et publiés par Ch.-Éd. Guillaume et L. Poincaré*. 4 vols. Paris: Gauthier-Villars, 1900–1901.
- SSFP* *Séances de la Société française de physique* [1873–1901, divisé en deux parties à partir de 1897, la première donnant le texte intégral de quelques communications, la seconde donnant les "procès-verbaux et résumés des communications" avec des numéros de pages étoilés]

Bibliographie

Amagat, Émile Hilaire

1900 Statique expérimentale des fluides (fluides non mélangés). *RCIP* 1, pp. 551–582.

1909 Sur la pression intérieure des fluides et la loi d'attraction intermoléculaire. *BSSFP* (29 mai), 62*, 226–239.

Arrhenius, Svante

1900 La dissociation électrolytique des solutions. *RCPI* 2, pp. 365–389.

Badash, Lawrence

1965a 'Chance favors the prepared mind': Henri Becquerel and the discovery of radioactivity. *Archives internationales d'histoire des sciences*, 18: 55–66.

1965b Radioactivity before the Curies. *American journal of physics*, 33: 128–135.

1996 The discovery of relativity. *Physics today*, 49 (2): 21–26.

Bauer, Edmond

1911 La structure discontinue de l'énergie [résumé]. *PVSFP* (1^{er} décembre), 82.

1912 *Recherches sur le rayonnement*. Thèse de doctorat. Paris : Gauthier-Villars.

1913 Les constantes du rayonnement intégral. *PVSFP* (18 avril), 45.

Bauer, Edmond, et Charles-Édouard Guillaume

1913 Remarques sur la communication de MM. Victor Henri et René Wurmser. *PVSFP* (2 mai), 55.

Bauer, Edmond, et Marcel Moulin

1909 La constante de la loi de Stefan. *BSSFP* (3 décembre), 81*.

1910 La constante de la loi de Stefan. *BSSFP*, 58–79.

1913 Addition à la communication du 18 avril [Bauer 1913] sur la constante de la loi de Stefan. *PVSFP* (2 mai), 52.

Bauer, Edmond, et Auguste Picard

1919 Sur les coefficients d'aimantation des gaz paramagnétiques et la théorie du magnéton. *PVSFP* (7 mars), 16–17.

Becquerel, Henri

1896a Sur les radiations émises par phosphorescence. *CR*, 122 (24 février) : 420–421.

1896b Sur les radiations invisibles émises par les corps phosphorescents. *CR*, 122 (2 mars) : 501–503.

1896c Émission des radiations invisibles par les corps phosphorescents. *SSFP* (6 mars).

1896d Sur quelques propriétés nouvelles des radiations invisibles émises par divers corps phosphorescents. *CR*, 122 (9 mars) : 559–564.

1896e Recherches sur les rayons émis par l'uranium et les sels de ce métal. *SSFP* (20 mars), 105.

1897 Sur la décharge des corps électrisés sous l'influence des radiations émises par l'uranium. *SSFP* (7 mai), 38*–39*.

1898 Allocution présentée dans la séance du 21 janvier 1898. *SSFP*, 5–7.

1899a Recherches sur les phénomènes de phosphorescence produits pas le rayonnement du radium. *SSFP* (15 décembre), 179–185.

1899b Influence du champ magnétique sur le rayonnement des corps radioactifs. *SSFP* (15 décembre), 71*, 186–193.

1900a Contribution à l'étude du rayonnement du radium. *SSFP* (16 février), 16*, 28–37.

1900b Sur le rayonnement du radium. *SSFP* (4 mai), 43*.

1900c Sur le rayonnement de l'uranium et sur diverses propriétés physiques du rayonnement des corps radioactifs. *RCPI* 3, pp. 47–78.

Becquerel, Jean

1908a Sur les électrons positifs. *Le radium*, 5 : 193–200.

1908b Remarques au sujet de la communication de M. A. Dufour [Dufour 1908]. *BSSFP* (5 juin), 52*–54*.

1909 Remarques au sujet de la communication, de M. A. Dufour [Dufour 1909]. *BSSFP* (2 avril), 39*–40*.

Bénard, Henri

1900a Étude expérimentale des courant de convection dans une nappe liquide. – Régime permanent : tourbillons cellulaires. *SSFP* (18 mai), 46*, 202–212.

1900b Les tourbillons cellulaires dans une nappe liquide. – Méthodes optiques d'observation et d'enregistrement. *SSFP* (1^{er} juin), 51*, 213–226.

Benoist, Louis

1896 Remarques sur la communication précédente [Perrin 1896d]. *SSFP* (4 décembre), 289–290.

1897a Sur la loi de transparence des corps pour les rayons X. *SSFP* (19 février), 13*, 21–25.

1897b Remarques au sujet de la communication de M. Jean Perrin [Perrin 1897]. *SSFP* (19 mars), 23*.

1901 Lois de transparence de la matière pour les rayons X. *SSFP* (5 juillet), 67*, 204–219.

Benoist, Louis, et Dragomir Hurmuzescu

1896a Nouvelles propriétés sur les rayons X. *SSFP* (20 mars), 107.

1896b Nouvelles recherches sur les rayons X. *SSFP* (20 mars), 108.

1896c Action des rayons X sur les corps électrisés. *SSFP* (17 juillet), 261–266.

Biézunsky, Michel

1991 *Einstein à Paris : le temps n'est plus...* Saint-Denis : Presses Universitaires de Vincennes.

Bigg, Charlotte

2008 Evident atoms: Visuality in Jean Perrin's Brownian motion research. *Studies in the history and philosophy of science*, 39: 312–322.

Blanc, Auguste

1908 Recherches sur les mobilités des ions dans les gaz. *BSSFP* (3 juillet), 156–169.

1911 L'ionisation par choc et l'étincelle électrique [résumé]. *PVSFP* (1^{er} mars), 39.

Bloch, Eugène

1904 L'ionisation par le phosphore et par les actions chimiques. *BSSFP* (6 février), 8*, 179–186.

1905 Sur la conductivité des gaz issus d'une flamme. *BSSFP* (2 juin), 83*.

1906 Remarques au sujet de la communication de M. Villard [Villard 1906]. *BSSFP* (4 mai), 54*.

1908 Sur l'ionisation de l'air par la lumière ultra-violette. *BSSFP* (25 mai), 44*.

1910 Étude de l'effet photoélectrique de Hertz pour des radiations de longueur d'onde bien définie. *BSSFP* (6 mai), 44*.

1911 La théorie électronique des métaux [résumé]. *PVSFP* (15 décembre), 88.

1919 Sur la théorie des chaleurs spécifiques des corps solides. *PVSFP* (21 mars), 20–21.

Bloch, Léon

1910 Sur les ions et les particules neutres présents dans certains gaz récemment préparés. *BSSFP* (28 novembre), 70*.

1920 Recension de *Atombau und Spekrallinien*, Arnold Sommerfeld, *JPR*, 1 : 31–32.

Bloch, Léon et Eugène

1908 Ionisation par le phosphore et la phosphorescence. *BSSFP* (18 décembre), 75*.

Blondel, André

1900 Remarques au sujet de la communication de M. Raveau. *SSFP* (16 mars), 22*.

Blondlot, Proper-René

1903a Sur une nouvelle espèce de lumière. *CR*, 136 (23 mars) : 735–738.

1903b Sur l'existence, dans les radiations émises par un bec Auer, de rayons traversant les métaux, le bois, etc. *CR*, 136 (11 mai) : 1120–1123.

1903c Sur de nouvelles sources de radiations susceptibles de traverser les métaux, le bois, etc., et sur de nouvelles actions produites par ces radiations. *CR*, 136 (25 mai) : 1227–1229.

1903d Sur l'existence de radiations solaires capables de traverser les métaux, le bois, etc. *CR*, 136 (15 juin) : 1421–1422.

Borel, Émile

1912 Sur la théorie des résonateurs. *PVSFP* (21 juin), 77.

1914 Sur les probabilités géométriques et leurs relations avec les hypothèses de continuité et de discontinuité. *PVSFP* (6 février), 14.

1920 Quelques réflexions sur la mesure des grandeurs physiques. *PVSFP* (15 avril), 38–40.

Bose, Jagadish Chandra

1902 Sur la réponse électrique de la matière vivante et animée, soumise à une excitation. — Deux procédés d'observation de la réponse de la matière vivante. *BSSFP* (5 avril), 31*, 66–76.

Bouty, Edmond

1897 Allocution prononcée dans la séance du 15 janvier 1897. *SSFP*, 5–8.

Brillouin, Léon

1922 *La théorie des quanta et l'atome de Bohr*. Paris : Blanchard (pour *JPR*).

Brillouin, Marcel

1899 Théorie moléculaire du frottement des solides polis. *SSFP* (3 mars), 21*.

1900 La diffusion des gaz sans paroi poreuse dépend-elle de la concentration ? *RCIP* 1, pp. 512–530.

1912 Les vibrations propres moléculaires et les chaleurs spécifiques des solides, d'après M. Born et M. Karman. *PVSFP* (3 mai), 60–62.

1915 La théorie du rayonnement et les chaleurs spécifiques des solides. *PVSFP* (16 avril), 21–25.

1925 Les débuts de la Société française de Physique. In *Le livre du cinquantenaire de la Société française de physique*, pp. 5–18. Paris : Éditions de la *Revue d'optique théorique et expérimentale*.

Broca, André

1896a [Observation sur la nature des rayons X]. *SSFP* (7 février 1896), 42.

1896b Sur l'épilation par les rayons X. *SSFP* (4 décembre), 292.

1898 Quelques propriétés des décharges électriques produites dans un champ magnétique. Assimilation au phénomène de Zeeman. *SSFP* (18 mars), 25*, 23–30.

1903 Remarques au sujet de la communication de M. Pellat [Pellat 1903]. *BSSFP* (6 février), 10*.

1906 Remarques au sujet de la communication de M. Villard [Villard 1906]. *BSSFP* (4 mai), 54*.

Buchwald, Jed

1985 *From Maxwell to microphysics: Aspects of electromagnetic theory in the last quarter of the nineteenth century*. Chicago: Chicago University Press.

1989 *The rise of the wave theory of light: Optical theory and experiment in the early nineteenth century*. Chicago: University of Chicago Press.

Buchwald, Jed, and Andrew Warwick (eds.)

2001 *Histories of the electron: The birth of microphysics*. Cambridge Mass: MIT Press.

Bustamante, Martha Cecilia

2002 Rayonnement et quanta en France : 1900–1914. *Physis*, 39 : 63–108.

2011 Paul Langevin et le Conseil Solvay de 1911. *Images de la physique* (2011), 3–9.

2019 *À l'aube de la théorie des quanta : Notes inédites d'Émile Borel sur un cours de Paul Langevin au Collège de France (1912–1913)*. Turnhout : Brepols.

Bustamante, Martha Cecilia, Andrés Martínez Matiz, et Terry Shinn

2005 Naissance et premiers pas de la SFP : 1873–1905. *Bulletin de la Société Française de Physique*, 149 : 15–27.

Büttner, Jochen, Jürgen Renn et Matthias Schemmel

2003 Exploring the limits of classical physics: Planck, Einstein, and the structure of a scientific revolution. *Studies in history and philosophy of modern physics*, 34: 37–59.

Carazza, Bruno, et Helge Kragh

1990 Augusto Righi's magnetic rays: A failed research program in early 20th-century physics. *Historical studies in the physical and biological sciences*, 21: 1–28.

Carvallo, Emmanuel

1900 Les théories et formules de la dispersion. *RCPI* 2, pp. 175–199.

Chabaud, Victor

1896a Sur la construction des tubes de Crookes. *SSFP* (8 avril), 130–134.

1896b Nouveaux tubes pour rayons Röntgen. *SSFP* (17 avril), 138.

Chabaud, Victor, et Diagomir Hurmuzescu

1896 Sur la relation entre le maximum de production des rayons X, le degré du vide, et la forme des tubes. *SSFP* (5 juin), 206.

Chappuis, James

1896 Photographies obtenues avec les rayons X. *SSFP* (17 avril), 138.

Charpentier, Augustin

1904 Sur les rayons N émis par le corps humain. *BSSFP* (9 avril), 32*–33*.

Colardeau, Emmanuel

1896a Nouvelle forme de tube de Crookes. *SSFP* (17 avril), 139.

1896b Sur une nouvelle forme de tubes de Crookes permettant d'obtenir, avec de courtes poses, des images photographiques d'une grande netteté. *SSFP* (19 juin), 213.

Cornu, Alfred

1897 Sur l'observation et l'interprétation théorique des phénomènes découverts par M. Zeeman. *SSFP* (5 novembre), 60*–61*, 138–143.

1900 Compte rendu du Congrès international de physique. *SSFP* (16 novembre), 60*–62*.

1901 Allocution prononcée dans la séance du 18 janvier 1901. *SSFP*, 5–7.

Cotton, Aimé

1908 Remarques sur les expériences de MM. J. Becquerel et A. Dufour. *BSSFP* (5 juin), 54*–55*.

Cotton, Aimé, et Camille Raveau

1906 Expériences sur les rayons N. *BSSFP* (2 mars), 27*.

Crémieu, Victor

1900a Remarques au sujet de la communication de M. Raveau [Raveau 1900]. *SSFP* (16 mars), 21*.

1900b Recherches sur l'existence du champ magnétique produit par le mouvement d'un corps électrisé. *SSFP* (6 juillet), 56*.

1900c Sur la convection électrique et les expériences de M. Rowland. *SSFP* (21 décembre), 69*.

1901a. Expériences nouvelles sur la convection électrique. *SSFP* (15 février), 15*.

1901b Convection électrique et courants ouverts. *SSFP* (3 mai), 54*, 152–169.

1901c *Recherches expérimentales sur l'électrodynamique des corps en mouvement*. Thèse de doctorat, Université de Paris.

1902 État actuel de la question de la convection électrique. *BSSFP* (5 décembre), 58*, 153–172.

1905 Recherches expérimentales sur la gravitation. *BSSFP* (17 novembre), 103*, 485–499.

Curie, Marie

1912 Les rayonnements des corps radioactifs. *IMCM*, 272–303.

Curie, Marie, et Pierre Curie

1899 Les rayons de Becquerel et les corps radio-actifs. *SSFP* (3 mars), 22*–23*.

Curie, Pierre

1993 Propriétés magnétiques des corps à diverses températures. *SSFP* (21 avril), 128–129.

1899 Remarque au sujet de la communication de M. H. Becquerel. *SSFP* (15 décembre), 72*.

1903a Sur les recherches récentes relatives aux corps radioactifs. *BSSFP* (16 avril), 31*–32*.

1903b Sur le dégagement de chaleur spontané du radium. *BSSFP* (3 juillet), 52*.

1903c Production de la phosphorescence d'un grand nombre de corps par l'émanation du radium. *BSSFP* (3 juillet), 53*.

1905 Sur la radioactivité induite du radium. *BSSFP* (3 mars), 36*–38*.

Curie, Pierre, et Marie Curie

1900a Sur les propriétés des corps radio-actifs. *SSFP* (19 janvier), 10*.

1900b Radiations diverses des corps radio-actifs, *SSFP* (2 mars), 20*.

1900c Les nouvelles substances radioactives et les rayons qu'elles émettent. *RCPI* 3, pp. 79–114.

Curie, Pierre, et Georges Sagnac

1901 Électrisation négative des rayons secondaires. *SSFP* (3 mai), 179–187.

Cuvaj, Camillo

1970 *A history of relativity. The role of Henri Poincaré and Paul Langevin*. PhD diss. Yeshiva University.

1971 Paul Langevin and the theory of relativity. *Japanese studies in the history of science*, 10: 113–142.

Dahl, Per

1997 *Flash of the cathode rays: A history of J. J. Thomson's electron*. Bristol: Institute of physics.

Darrigol, Olivier

1992 *From c-numbers to q-numbers: The classical analogy in the history of quantum theory*. Berkeley: University of California Press.

1998 Aux confins de l'électrodynamique maxwellienne : Ions et électrons vers 1897. *Revue d'histoire des sciences*, 51 : 5–34.

2000a *Electrodynamics from Ampère to Einstein*. Oxford: Oxford University Press.

2000b Poincaré, Einstein et l'inertie de l'énergie. *Comptes rendus physique*, 1 : 143–153.

2012 *A history of optics from Greek antiquity of the nineteenth century*. Oxford: Oxford University Press.

2014a Georges Sagnac: A life for optics. *Comptes rendus physique*, 15 : 589–840.

2014b The quantum enigma. In Michel Janssen and Christoph Lehner (eds.), *The Cambridge companion to Einstein* (Cambridge: Cambridge University Press), 117–142.

2018 *Atoms, mechanics, and probability: Ludwig Boltzmann's statistico-mechanical writings— an exegesis*. Oxford: Oxford University Press.

2021 *Relativity principles and theories from Galileo to Einstein*. Oxford: Oxford University Press.

Debierne, André

1912 Sur les transformations des corps radioactifs. *PVSFP* (1^{er} mars), 30–32 [résumé] ; *IMCM*, 304–33.

de Broglie, Louis

1921 Considérations théoriques sur l'absorption des rayons X par la matière. *PVSFP* (18 février), 15–16.

de Broglie, Maurice

1907 Sur les centres neutres des gaz issus de flammes. *BSSFP* (21 juin), 60*.

1909 Les suspensions dans les gaz et les dernières mesures de la charge atomique par les mouvements dans un champ et l'agitation brownienne des poussières chargées. *BSSFP* (4 juin), 67*–68*.

1913 Nouveaux phénomènes de diffraction des rayons X par les réseaux cristallin. *PVSFP* (4 avril), 41.

1914a Photographie d'un spectre de rayons de Röntgen, émis par un tube anticathode de platine et muni d'une fenêtre en verre transparent au lithium (verre Lindemann). *PVSFP* (16 janvier), 13.

1914b Analyse spectrale des rayons secondaires des rayons de Röntgen. *PVSFP* (5 juin), 55.

1914c Les progrès de nos connaissances concernant les rayons de Röntgen. *PPM*, 47–73,

1919 Remarques sur les droites représentant la loi de Moseley. *PVSFP* (4 avril), 22.

1921a Remarques sur l'équation photoélectrique d'Einstein. *PVSFP* (4 février), 10.

1921b Les phénomènes photo-électriques correspondant aux rayons X et les spectres corpusculaires des éléments. *PVSFP* (20 mai), 48–49.

1922a Nouvelles recherches sur les corpuscules rapides extraits des atomes par les rayons X. *BSFP* (5 mai), 100S.

1922b *Les rayons X*. Paris : Presses universitaires de France (pour *JPR*).

de Broglie, Maurice, et Léopold Brizard

1910 L'ionisation des gaz par voie chimique. *BSSFP* (20 mai), 53*.

de Broglie, Maurice, et Paul Langevin (secrétaires)

1912 *La théorie du rayonnement et les quanta. Rapports et discussions de la réunion tenue à Bruxelles, du 30 octobre au 3 novembre 1911, sous les auspices de M. E. Solvay*. Paris : Gauthier-Villars.

Drude, Paul

1900 Théorie de la dispersion dans les métaux fondée sur la considération des électrons. *RCPI* 3, pp. 34–46.

Dufour, Alexandre

1908 Modifications normales et anormales, sous l'influence d'un champ magnétique, de certaines bandes des spectres d'émission de molécules de divers corps à l'état gazeux. *BSSFP* (5 juin), 51*–52*, 225–253.

1909 Sur quelques expériences relatives à l'hypothèse de l'existence d'électrons positifs aux basses pressions dans certains tubes à décharges électriques. *BSSFP* (2 avril), 37*, 61–71.

Dufour, Henri

1896 Observations sur les rayons Röntgen. *SSFP* (7 février), 43.

Dunoyer, Louis

1911 Rayonnement matériel. *PVSFP* (7 juillet), 75.

1912 Les gaz ultra-raréfiés [résumé]. *PVSFP* (15 mars), 39–41.

Einstein, Albert

1905a Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt. *Annalen der Physik*, 17: 132–148.

1905b Zur Elektrodynamik bewegter Körper. *Annalen der Physik*, 17: 891–921.

1905c Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhängig? *Annalen der Physik*, 18: 639–641.

1907 Plancksche Theorie der Strahlung und die Theorie der Spezifischen Wärme. *Annalen der Physik*, 22: 180–190.

1913 Les bases thermodynamiques de la loi des équivalents photochimiques [conférence du 27 mars organisée par la SFP]. *PVSFP*, 23.

Fortin, Charles

1904 Sur la déviation électrostatique des rayons magnétocathodiques. *BSSFP* (17 juin), 55*–57*.

Gouy, Louis Charles

1911 Sur la structure et les propriétés des rayons magnéto-cathodiques dans un champ uniforme. *Le radium*, 8 : 129–134.

Guillaume, Charles-Édouard

1896a Remarques sur les rayons X. *SSFP* (20 mars), 105.

1896b Remarques sur la communication de M. Perrin. *SSFP* (4 décembre), 291.

1896c Sur l'émission des rayons X. *SSFP* (18 décembre), 312.

1897 Recherches sur les aciers au Nickel. *SSFP* (2 juillet), 120–133.

1899a Recherches récentes sur la radiation d'un corps noir. *SSFP* (6 janvier), 3*.

1914 Allocution du président sortant. *PVSFP* (16 janvier), 2–8.

Guillaume, Charles-Édouard, and Lucien Poincaré

1900 Avertissement. *RCIP* 1, pp. i–xv.

Hadamard, Jacques

1906 Les problèmes aux limites dans la théorie des équations aux dérivées partielles. *BSSFP* (16 novembre), 74*, 276–314.

1907 Sur l'interprétation théorique des raies spectrales. *BSSFP* (6 décembre), 73*.

Harman, Peter

1982 *Energy, force, and matter: The conceptual development of nineteenth-century physics*. Cambridge: Cambridge University Press.

Henri, Victor

1908 Étude cinématographique des mouvements browniens. *BSSFP* (15 mai), 45*–46*.

Henri, Victor, et René Wurmser

1913 Étude expérimentale de la loi d'équivalence photochimique de Einstein. *PVSFP* (2 mai), 53–54.

Hurmuzescu, Diagomir

1896 [Décharge des corps électrisés par les rayons X]. *SSFP* (7 février 1896), 42.

1898 Sur la transformation des rayons X. *SSFP* (16 avril), 66–68.

1899 Sur la transformation des rayons X par les différents corps. *SSFP* (21 avril), 43*.

Indorato, Luigi, et Guido Masotto

1989 Poincaré's role in the Crémieu-Pender controversy over electric convection. *Annals of science*, 46: 117–163.

Jobin, Amédée

1998 Spectroscopie interférentielle de MM. A. Perot et Ch. Fabry. *SSFP* (20 mai), 46*–49*.

Joubert, Jules François

1895 Allocution du président sortant. *SSFP* (15 janvier), 22–25.

Kelvin, Lord (William Thomson)

1900 Sur le mouvement d'un solide élastique traversé par un corps agissant sur lui par attraction ou répulsion. *RCIP* 2, pp. 1–19.

Kojima, Chieko

2004 La physique française avant Louis de Broglie. *Annales de la fondation Louis de Broglie*, 29: 767–783.

Kuhn, Thomas

1978 *Black-body theory and the quantum discontinuity, 1894–1912*. Chicago: The University of Chicago Press.

Langevin, Paul

1900 Sur l'ionisation des gaz. *BSSFP* (20 avril), 39*–40*.

1902a Recherches sur les gaz ionisés, *BSSFP* (6 juin), 45*–46*.

1902b Sur les gaz ionisés. *BSSFP* (20 juin), 49*.

1904 Sur les ions de l'atmosphère. *BSSFP* (2 décembre), 67*–69*.

1905a Sur la théorie du magnétisme. *BSSFP* (20 janvier), 13*–16*.

- 1905b Recherches récentes sur la théorie de la décharge disruptive. *BSSFP* (17 février), 25*–28*.
- 1905c Sur les ions de l'atmosphère. *BSSFP* (19 mai), 79*–80*.
- 1905d Sur la théorie du magnétisme. *JP*, 4 : 678–693.
- 1905e La physique des électrons. *Revue générale des sciences pures et appliquées*, 16 : 257–276.
- 1908 Recherches sur les mobilités des ions dans les gaz. *BSSFP* (3 juillet), 64*.
- 1910 La théorie électromagnétique et le bleu du ciel. *BSSFP* (16 décembre), 80*–81*.
- [1911] Les grains d'électricité et la dynamique électromagnétique. *IMCM*, 54–114.
- 1913 L'inertie de l'énergie et ses conséquences [conférence du 26 mars organisée par la SFP]. *PVSFP*, 23 et *JP*, 3 : 553–591.
- 1914 La physique du discontinu. *PPM*, 1–46.
- 1919a Observations au sujet des résultats communiqués par M. Bauer [Bauer et Piccard 1919]. *PVSFP* (21 mars), 18–20.
- 1919b Vérifications expérimentales récentes du principe de relativité [titre seulement]. *PVSFP* (19 décembre), 55.
- 1920 Les aspects successifs du principe de relativité. *PVSFP* (6 février), 6–13.
- 1921 Sur la dynamique de la relativité. *PVSFP* (16 décembre), 97–98.
- 1922 Le calcul tensoriel et ses applications [titre de trois conférences-rapports donnée le 6, 13 et 20 février]. *BSFP*, p. 140S.

Lebedev, Pyotr Nikolayevich

- 1900 Les forces de Maxwell-Bartoli dues à la pression de la lumière. *RCIP* 2, pp.133–140.

Lelong, Benoit

- 1997 Paul Villard, J.-J. Thomson et la composition des rayons cathodiques. *Revue d'histoire des sciences*, 50 : 89–130.
- 2001 Paul Villard, J. J. Thompson, and the composition of cathode rays. In Buchwald and Warwick 2001, pp. 135–168.
- 2005 Ions, electrometers, and physical constants: Paul Langevin's laboratory work on gas discharges, 1896-1903. *Historical studies in the physical sciences*, 36: 93–130.

Lémeray, Maurice-Ernest

- 1911 Sur la pression de radiation. *PVSFP* (19 mai), 61–62.
- 1912 Sur le théorème de M. Einstein. *PVSFP* (6 décembre), 104.

Lippmann, Gabriel

- 1900 La théorie cinétique des gaz et le principe de Carnot. *RCIP* 1, pp. 546–550.

Lorentz, Hendrik Antoon

- 1900 Théorie des phénomènes magnéto-optiques récemment découverts. *RCPI* 3, pp. 1–33.
- 1905 La thermodynamique et les théories cinétiques. *BSSFP* (27 avril), 35–62.
- 1912 *les méthodes statistiques en thermodynamique : conférences faites au Collège de France en novembre 1912*. Éd. par Louis Dunoyer. Leipzig : Teubner

Malley, Marjorie

- 2011 *Radioactivity: A history of a mysterious science*. Oxford: Oxford University Press.

Martínez, Andrés Matiz

2004 Les origines et les premières années de la Société française de physique (1873–1905). Mémoire de DEA (Université Paris 7) dirigé par Martha-Cecilia Bustamante et Terry Shinn.

Martins, Roberto de Andrade

1997 Becquerel and the choice of uranium compounds. *Archive for history of exact sciences*, 51: 67–81.

2013 The guiding hypothesis of the Curies' radioactivity research: Secondary X-rays and the Sagnac connection. In Roberto de Andrade Martins, Guillermo Boido, and Victor Rodriguez (eds.), *History and philosophy of physics in the South Cone* (London: College publications), 45–65.

Miller, Arthur

1981a *Albert Einstein's special theory of relativity: Emergence (1905) and early interpretation, 1905–1911*. Reading, Mass: Addison-Wesley.

1981b Unipolar induction: A case study of the interaction between science and technology. *Annals of Science*, 3: 155–189.

Moulin, Marcel

1909 Remarques sur la communication de M. A. Dufour [Dufour 1909]. *BSSFP* (2 avril), 42*.

Nagaoka, Hantaro, et Kotaro Honda

1902 Magnétostriktion des aciers-nickels. *BSSFP* (21 mars), 16*–19*, 42–47.

Navarro, Luis, et Josep Olivella

1997 On the nature of the hypotheses in Langevin's magnetism. *Archives internationales d'histoire des sciences*, 47 : 316–345.

Nernst, Walther

1910 Sur les chaleurs spécifiques aux basses températures et le développement de la thermodynamique. *BSSFP* (1^{er} avril), 19–47.

Netter, Francis

1973 Une adolescente déjà centenaire.

Nye, Mary Jo

1972 *Molecular reality: A perspective on the scientific work of Jean Perrin*. London: MacDonal.

1980 N-rays: An episode in the history and psychology of science. *Historical studies in the physical sciences*, 11: 125–156.

Paty, Michel

1987 The scientific reception of relativity in France. In Thomas Glick (ed.), *The comparative reception of relativity, Boston studies in the philosophy of science*, vol. 103 (Dordrecht: Reidel), 113–167.

1999 Paul Langevin (1872–1946), la relativité et les quanta. *Bulletin de la Société française de physique*, 119 : 15–20.

2002 Poincaré, Langevin et Einstein. *Épistémologiques*, 2 : 33–73.

Pellat, Henri

1903 De la magnétofriction dans les tubes à gaz raréfiés. *BSSFP* (6 février), 9*, 21–28.

1904a Du rôle des corpuscules dans la formation de la colonne anodique. Loi générale de la magnétofriction. *BSSFP* (4 mars), 18*, 12–20.

1904b Remarques au sujet de la communication de M. Villard [Villard 1904a]. *BSSFP* (6 mai), 46*–47*.

Pender, Harold, et Victor Crémieu

1903 Recherches contradictoires sur l'effet magnétique de la convection électrique. *BSSFP* (17 avril), 33*, 136–161.

Pérot, Alfred

1920 Comparaison des longueurs d'onde terrestres et solaires d'une raie de bande du carbone. *PVSFP* (3 décembre), 50.

1921 Mesures de la pression dans une région de la couche renversante du Soleil ; longueur d'onde de b_2 dans le Soleil et sur Terre (effet Einstein). *PVSFP* (17 juin), 60–61.

Pérot, Alfred, et Charles Fabry

1904 Rapport sur la nécessité d'établir un nouveau système de longueurs d'onde étalons, présenté au nom de la Société française de physique. *BSSFP*, 179–187.

Perrin, Jean

1896a Quelques propriétés des rayons Röntgen. *SSFP* (7 février), 40–41.

1896b Rayons cathodiques, rayons X et radiations analogues. *SSFP* (8 avril), 121–129.

1896c Mécanisme de la décharge des corps électrisés par les rayons de Röntgen. *SSFP* (17 juillet), 254.

1896d Décharges par les rayons X ; influence de la pression et de la température. *SSFP* (4 décembre), 288.

1897a Décharge par les rayons X. – Effet métal. *SSFP* (19 mars), 22*, 37–44.

1897b Remarques au sujet de la communication de M. G. Sagnac (Sagnac 1897c). *SSFP* (17 décembre), 73*.

1900 Osmose. Parois semi-perméables. *RCIP* 1, pp. 531–545.

1909 Mouvement brownien et molécules. *BSSFP* (15 avril), 155–188.

1911 Les preuves de la réalité moléculaire. *PVSFP* (10 novembre), 80.

Perrin, Jean, et Paul Langevin

1905 Remarque au sujet de la communication de M. P. Villard [Villard 1905]. *BSSFP* (17 février), 31*.

Pestre, Dominique

1984 *Physique et physiciens en France, 1918–1940*. Paris : Archives contemporaines.

Picard, Émile

1922 *La théorie de la relativité et ses applications à l'astronomie*. Paris : Gauthier-Villars.

Poincaré, Henri

1900 Relations entre la physique expérimentale et la physique mathématique. *RCIP* 1, pp. 1–29.

1903a Allocution prononcée dans la séance du 16 janvier. *BSSFP*, 2*, 5–8.

1903b Remarque au sujet de la communication de M. G. Sagnac. *BSSFP* (5 juin), 47*.

1905a Sur la dynamique de l'électron. *CR*, 140 : 1504–1508.

1905b Sur la dynamique de l'électron. *QEE*, 576–580.

1906 Réflexions sur la théorie cinétique des gaz. *BSSFP* (6 juillet), 67*, 150–184.

Poincaré, Lucien

1900 Quelques remarques sur les théories de la pile voltaïque. *RCPI* 2, pp. 403–421.

1912 Allocution du président sortant. *PVSFP* (19 janvier), 6–8.

Príncipe da Silva, João

2008 *La réception française de la mécanique statistique*. Thèse de doctorat, Université Paris Diderot.

Quédec, Pierre

1988 Weiss' Magneton: The sin of pride or a venial mistake? *Historical studies in the physical and biological sciences*, 18: 349–375.

Quentin, Michel

1996 Qui a découvert la fluorescence X ? *Journal de physique*, 4 (suppl.) : 599–609.

Radiguet, Marie-Honoré

1897 Action lumineuse des rayons X. *SSFP* (19 février), 15*.

Raveau, Camille

1896 Les rayons X et les rayons ultra-violet. *SSFP* (7 février 1896), 42.

1897 Nouvelles observations de M. Röntgen sur les rayons X. *SSFP* (16 juillet), 58*, 135–137.

1900 Sur la loi élémentaire des actions électromagnétiques et l'induction unipolaire. *SSFP* (2 mars), 18*–19*, 44–46.

Renn, Jürgen, Michel Janssen, John Norton, Tilman Sauer, Matthias Schemmel, John Stachel

2007 *The genesis of general relativity*. 4 vols. Dordrecht: Springer.

Righi, Auguste

1908 Sur quelques phénomènes dus aux rencontres entre électrons, ions, atomes et molécules. *BSSFP* (28 avril), 47–74.

Röntgen, Wilhelm

1895 Über eine neue Art von Strahlen. Physikalisch-Medizinische Gesellschaft in Würzburg, *Sitzungsberichte*: 132–141.

Rydberg, Johannes

1900 La distribution des raies spectrales. *RCPI* 2, pp. 200–224.

Sagnac, Georges

1897a Illusions qui accompagnent la formation des pénombres. – Application aux rayons X. *SSFP* (15 janvier), 3*, 9–13.

1897b Remarque sur les expériences de M. Röntgen. *SSFP* (16 juillet), 59*.

1897c Sur la transformation des rayons X par les métaux. *SSFP* (17 décembre), 72*.

1898a Sur la transformation des rayons X par diffusion. *SSFP* (18 mars), 23*–24*.

1898b Transformation des rayons X par la matière. *SSFP*, 115–139.

1899a Sur la transformation des rayons X par les divers corps simples. *SSFP* (6 janvier), 1*.

1899b Remarques au sujet de la communication de M. Villard [Villard 1899]. *SSFP* (17 février), 19*.

1899c Remarque au sujet de la communication de M. Hurmuzescu [Hurmuzescu 1899]. *SSFP* (21 avril), 43*.

1899d Sur une nouvelle manière d'envisager la propagation des ondes lumineuses à travers la matière. Théories nouvelles des phénomènes optiques d'entraînement de l'éther. *SSFP* (17 novembre), 66*.

1900 Explication nouvelle de la propagation de la lumière à travers les milieux doués d'une absorption sélective. *SSFP* (5 janvier), 3*.

1901 Nouvelles recherches sur les rayons de Röntgen. *SSFP* (4 janvier), 1*, 61–76.

1903 La longueur d'onde des rayons N déterminée par la diffraction. *BSSFP* (5 juin), 46*, 173–183.

1920 Éther mécanique des ondes et relativité newtonienne de l'énergie totale. *PVSFP* (18 juin), 39.

1921 Le vent d'éther et la mécanique de la radiation [titre seulement]. *PVSFP*, 22.

Thiry, René

1922 Sur la possibilité de se représenter l'espace fini et sans bornes de la théorie de la relativité. *BSFP* (20 janvier, Strasbourg), 17S–18S.

Thomson, Joseph John

1897a Cathode rays. *Proceedings of the Royal Institution*, 15 (30 Avril) : 419–432.

1897b Cathode rays. *Philosophical magazine*, 44 : 293–316.

1900 Indications relatives à la constitution de la matière fournies par les recherches récentes sur le passage de l'électricité à travers les gaz. *RCPI* 3, pp. 138–151.

Thompson, Silvanus

1896 Tube focus. *SSFP* (17 avril), 137.

Turpain, Albert

1906 À propos des rayons N. *BSSFP* (16 mars), 31*, 94–100.

van der Mensbrugghe, Gustave

1900 Sur les phénomènes capillaires. *RCPI* 1, pp. 487–511.

van der Waals, Johannes Diderik

1900 Statique des fluides (mélanges). *RCIP* 1, pp. 583–614.

Vasilescu-Karpen, Nicolae

1903 Sur la convection électrique. *BSSFP* (18 avril), 34*, 162–172.

Villard, Paul

1897a Quelques résultats relatifs aux rayons cathodiques. *SSFP* (2 avril), 27*.

1897b Tubes de Crookes régénérables à volonté, et réglables même en marche. *SSFP* (4 juin), 48.

1898a Sur quelques propriétés des rayons cathodiques. *SSFP* (21 janvier), 10*.

1898b Sur les rayons cathodiques. *SSFP* (4 mars), 17*–18*, 69–92.

1898c Tube de Crookes régénérable. Écran magique. *SSFP* (20 mai), 45*.

1899 Sur l'action des rayons X. *SSFP* (17 février), 18*.

1900a Rayonnement du radium. *SSFP* (18 mai), 45*.

1900b Les rayons cathodiques. *RCPI* 3, pp. 115–137.

1904a Sur la décharge électrique dans les gaz raréfiés. *BSSFP* (6 mai), 44*.

1904b Sur les rayons cathodiques. *BSSFP* (3 juin), 51*.

1904c Remarque au sujet de la communication de M. Fortin [Fortin 1904]. *BSSFP* (17 juin), 57*.

1905 Sur les rayons cathodiques. *BSSFP* (17 février), 30*.

1906 Expériences relatives aux rayons cathodiques et magnétocathodiques. *BSSFP* (4 mai), 51*–52*.

1908a Les rayons cathodiques et l'aurore boréale. *BSSFP* (), 114–137.

1908b *Les rayons cathodiques*. Paris : Gauthier-Villars.

Voigt, Woldemar

1900 L'état actuel de nos connaissances sur l'élasticité des cristaux. *RCPI* 1, 277–347.

Walter, Scott

2010 Minkowski's modern world. In *Minkowski spacetime: A hundred years later*, pp. 43–61. Dordrecht: Springer.

2011 Henri Poincaré, theoretical physics, and relativity theory in Paris. In Karl-Heinz Schlotte and Martina Schneider (eds.), *Mathematics meets physics* (Frankfurt: Harri Deutsch), 213–239..

Weiss, Pierre

1907 L'hypothèse du champ moléculaire et la propriété ferro-magnétique. *BSSFP* (4 avril), 95–123.

1912 Les moments magnétiques des atomes et le magnéton. *PVSFP* (5 janvier), 1–2.

Wheaton, Bruce

1983 *The tiger and the shark: Empirical roots of wave-particle dualism*. Cambridge: Cambridge University Press.

Whittaker, Edmund

1910 *A history of the theories of aether and electricity: From the age of Descartes to the close of the nineteenth century*. London: Longmans, Green, & co.

Wiechert, Emil

1897 Über das Wesen der Elektrizität (Königsberg, 7 Janvier 1897). Physikalisch-ökonomische Gesellschaft zu Königsberg, *Schriften*, 38: 3–16.

Wien, Wilhelm

1900 Les lois théoriques du rayonnement. *RCIP* 2, pp. 23–40.

Wilson, C. T. R.

1913 La photographie des trajectoires des particules ionisantes [conférence du 28 mars organisée par la SFP]. *PVSFP*, 23.

Wood, Robert

1904 The *n*-rays. *Nature*, 70: 530–531.

Zeeman, Pieter

1896 On the influence of magnetism on the nature of the light emitted by a substance.

Physical laboratory at the University of Leiden, *Communications*, 23: 1–19.

1897a On the influence of magnetism on the nature of the light emitted by a substance.

PM, 43: 226–239.

1897b Doublets and triplets in the spectrum produced by external magnetic forces. *PM*,

44: 55–60.