



**HAL**  
open science

## LA PHYSIQUE À STRASBOURG : 1621 - 1918

René Voltz

► **To cite this version:**

| René Voltz. LA PHYSIQUE À STRASBOURG : 1621 - 1918. 2024. <hal-04463753>

**HAL Id: hal-04463753**

**<https://hal.science/hal-04463753v1>**

Preprint submitted on 28 Feb 2024

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons CC0 1.0 - Universal - International License

## LA PHYSIQUE À STRASBOURG : REGARDS SUR LE PASSÉ (1621-1918)

L'intérêt particulier de l'histoire de la physique à Strasbourg provient de la situation singulière de la ville et de son université aux frontières géographique et culturelle de deux civilisations (1,2).

À ses débuts, jusqu'à la Révolution française, l'université est intimement liée, par le sort et l'esprit, à la ville qui, dans une large autonomie, cultive une image de foyer culturel européen, héritée de son passé humaniste et luthérien. Après le régime napoléonien, ce sont cependant les politiques nationales, alternativement à Paris et à Berlin qui déterminent le destin local ; à l'issue des conflits entre les deux puissances nationales voisines, l'Université de Strasbourg sera alors éventuellement mobilisée comme une vitrine symbolique d'affirmation culturelle du vainqueur (3).

Dans notre parcours à travers les trois siècles de physique à Strasbourg, nous suivrons les étapes successives de l'histoire mouvementée de l'Université, puisque celle-ci a toujours été le lieu privilégié, sinon exclusif, de l'activité du physicien (4-6).

Les débuts de la physique moderne, avec la révolution galiléenne, ont lieu quand, dans la

Ville-libre germanique, la prestigieuse Haute-École humaniste et protestante de Jean STURM est reconnue comme université à part entière (1621). Forte de son audience européenne, l'Université impériale de Strasbourg contribue alors efficacement à la promotion des idées nouvelles par ses enseignements et par son activité de traduction et de diffusion par le livre des œuvres de GALILEE dans l'espace germanique ravagé par la guerre de Trente ans.

En 1681, l'annexion de Strasbourg à la royauté absolue et très catholique de Louis XIV rompt la longue tradition d'autonomie républicaine et protestante de la ville, mais lui réserve une durée de stabilité politique et économique. Mise en concurrence avec un établissement catholique, l'ancienne université arrive à maintenir son renom et sa substance tout en s'enrichissant de nouvelles composantes au contact de la culture française. En ce 18<sup>e</sup> siècle, les progrès de la nouvelle physique sont plus l'affaire des académies scientifiques que des universités. Mais les correspondants académiciens sont souvent des enseignants universitaires ; il en est ainsi pour les Strasbourgeois contribuant aux développements de l'analyse mathématique appliquée aux problèmes de mécanique, d'astronomie et de géodésie posés par la révolution newtonienne ; les savants locaux participent aussi aux recherches sur les propriétés calorifiques et chimiques des gaz qui inaugurent la révolution lavoisienne.

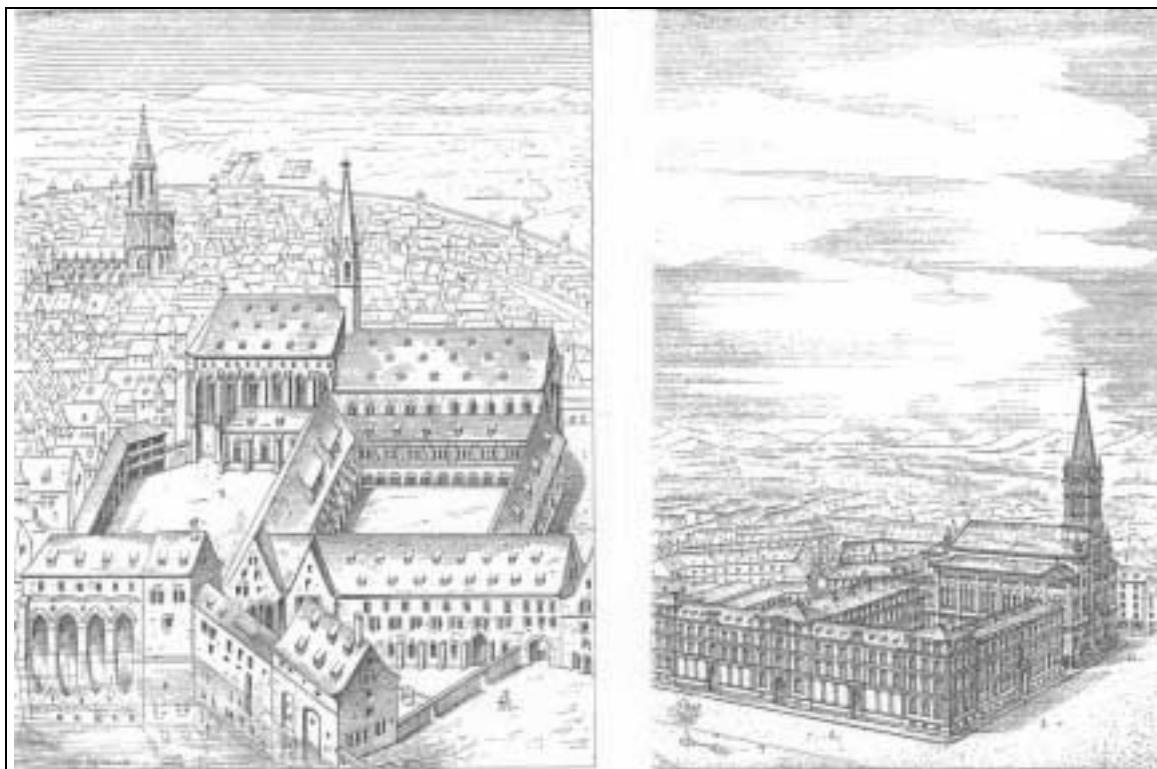
L'ancienne université, avec son esprit multiculturel hérité du 16<sup>e</sup> siècle, disparaît définitivement à l'aube du 19<sup>e</sup> siècle. En ces temps marqués par les bouleversements politiques, économiques et sociaux de la Révolution française et de la révolution industrielle, dans une Europe où s'affrontent les identités nationales, l'activité universitaire est mobilisée au service du prestige intellectuel et de la puissance technoscientifique de l'État ; en France, elle est soumise au système centralisé des facultés napoléoniennes qui réserve l'essentiel de son soutien aux établissements de la capitale.

C'est alors l'extraordinaire épanouissement de la physique mathématique à l'École Polytechnique. Mais à la Faculté des sciences locale, le relatif manque de moyens n'empêche pas les contributions pionnières de PASTEUR et de GERHARDT à la compréhension de la structure de la matière moléculaire et atomique ; pour sa part, le savant-industriel HIRN utilise ses ressources propres pour explorer la relation encore imprécise entre la chaleur et le travail mécanique.

Quand, à l'issue de la guerre de 1870, le nouvel Empire wilhelminien affirme toute la puissance militaire industrielle et intellectuelle du « titanisme allemand » (C.F. von Weizsäcker), l'Alsace, Strasbourg et l'université commencent à subir la suite des atroces conflits franco-allemands où elles servent comme emblèmes du triomphe ou du ressentiment des nationalismes belligérants. Il en est ainsi pour la période (1871-1918) quand Strasbourg devient capitale d'un *Reichsland* placé directement sous la tutelle du pouvoir impérial à Berlin : l'importante émigration alsacienne en France rêve de revanche, la population locale adhère peu au nouveau régime qui, pour sa part, veut restaurer l'ancienne identité germanique de la province et de la ville. Cette volonté se traduit, en particulier, par la création d'une université ambitieuse, destinée à servir par ailleurs d'établissement modèle pour la modernisation du système d'enseignement supérieur de la nouvelle Allemagne. La physique, motrice du développement scientifique, en profite pleinement avec la construction de laboratoires appropriés et le recrutement de responsables scientifiques jeunes et imaginatifs, tous expérimentateurs d'élite. Sous la direction des KUNDT, KOHLRAUSCH et BRAUN, l'Institut de physique strasbourgeois prend alors une part importante à l'épanouissement de la « physique classique » que connaît l'Allemagne en cette fin du 19<sup>e</sup> siècle ; plus tard, au début du 20<sup>e</sup> siècle, de nombreuses personnalités allemandes et russes formées à Strasbourg s'illustreront lors de l'édification de la physique contemporaine. Ces brillantes décades de la physique strasbourgeoise méritent d'être évoquées en détail ; elles sont en effet relativement mal connues car leur mémoire a été peu cultivée par la suite.

Après la défaite allemande en 1918, l'activité universitaire strasbourgeoise retrouve le cadre de l'Université de France qui, malgré les réformes de la III<sup>e</sup> République, conserve la structure napoléonienne avec les académies et leurs facultés. Dans les locaux construits par les Allemands, les physiciens ouvrent alors un nouveau chapitre où s'illustre Pierre WEISS et son école du magnétisme. À son tour, cette fructueuse période de la physique à Strasbourg est terminée par la guerre en 1939 ; sa mémoire a été rappelée par des rétrospectives récentes (7) et reste très vivante à l'Institut de physique actuel.

## L'UNIVERSITÉ IMPERIALE GERMANIQUE (17<sup>e</sup> siècle)

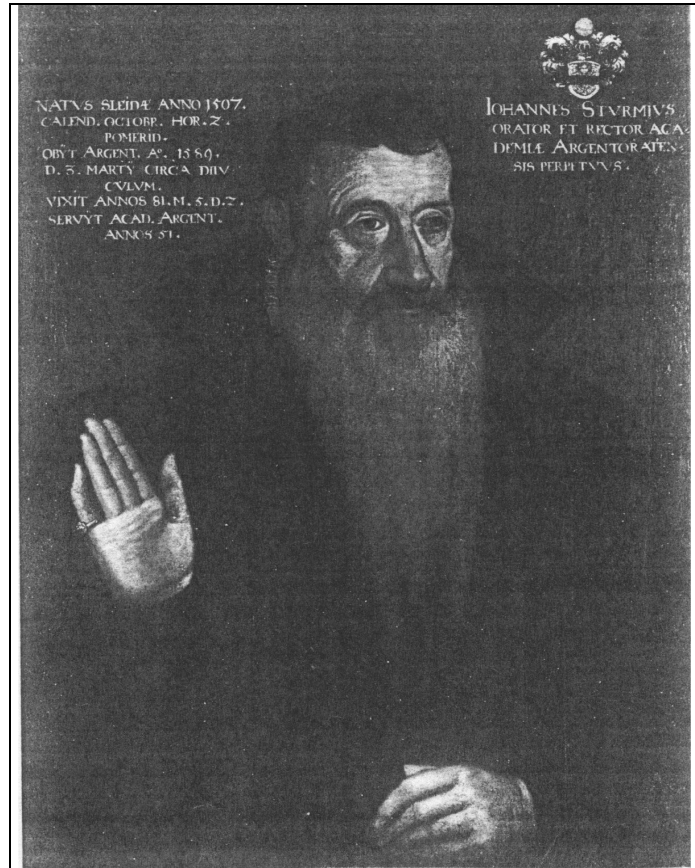


À gauche, les bâtiments de la Haute-école de Sturm puis de l'Université impériale au 17<sup>e</sup> siècle. Ils proviennent de l'ancien couvent des Dominicains datant du 13<sup>e</sup> siècle. En 1681, l'église devient le Temple Neuf, premier temple paroissial de la Confession d'Augsbourg ; elle sera détruite lors du bombardement du 24 août 1870, où disparaîtra aussi l'inestimable bibliothèque héritée du riche passé culturel de la ville.

À droite, l'ensemble actuel des bâtiments du Temple-Neuf et du Gymnase Jean Sturm reconstruits sur le même emplacement entre 1872 et 1877.

C'est en 1538 que l'on date généralement les débuts de l'Université de Strasbourg avec la création du Gymnase protestant par Jean STURM, suivie par la transformation en Académie ou Haute-École en 1567 (2,3,8,9). Cette École incarne alors l'esprit de l'extraordinaire épanouissement culturel de l'humanisme puis de la réforme au 16<sup>e</sup> siècle à Strasbourg, Ville-libre au sein du Saint-empire romain germanique. Son enseignement comprend pratiquement l'ensemble des disciplines des quatre facultés universitaires de l'époque : philosophie, théologie, droit et médecine ; mais les grades délivrés se limitent à la faculté de philosophie, donc aux matières de formation générale, littéraire et scientifique, comprenant les mathématiques, l'astronomie et la physique sous la forme encore aristotélicienne. Par la rigueur de son projet et de son organisation pédagogiques, l'institution de J. STURM s'impose rapidement comme un établissement modèle de réputation européenne. L'objectif énoncé est « *sapiens atque eloquens pietas* » ; les élites dirigeantes doivent être formées dans l'esprit de la réforme luthérienne, en cultivant l'éloquence latine au service de l'épanouissement moral et intellectuel, avec CICERON comme figure emblématique. Mais, pour l'essentiel, les normes restent celles de la culture classique sans attention particulière à la révolution copernicienne qui est en cours. Une personnalité représentative de l'époque est Conrad DASYPIDIUS (1532-1604) qui, après des études à l'Académie, y enseigne les mathématiques et l'astronomie (9,12). En utilisant les ressources qu'offre

l'imprimerie strasbourgeoise pour l'enseignement et la diffusion de ses spécialités scientifiques, il édite et commente les *Eléments d'Euclide* (1564), publie un traité de *Géométrie sphérique* (1572) ainsi qu'un dictionnaire mathématique, le *Lexicon seu Dictionarium Mathematicum* (1573) ; son ouvrage sur les comètes, *De Cometis & Cometarum effectibus* (1577) reste fidèle à l'orthodoxie géocentrique de PTOLEMÉE. On peut rappeler aussi que c'est lui qui a conçu la première horloge astronomique de Strasbourg (1572).



Jean STURM (1507-1589)

Fondateur de la Haute-École et de l'Académie, berceau de l'Université de Strasbourg. En ce 16<sup>e</sup> siècle, son enseignement vise à la « piété, fondée sur le savoir et l'éloquence ».

En 1621, le rayonnement européen de la Haute-École est reconnu par sa transformation en Université à part entière, regroupant l'ensemble des quatre facultés, toutes habilitées à créer « *doctores, licentiatos, magistros, poetas lameatos et baccalaureos* » (8,9). En réalité, cette initiative du très catholique empereur Ferdinand II obéit à une intention autant politique que culturelle : au début de son conflit avec l'Union évangélique, il veut s'assurer la neutralité de la Ville impériale protestante qu'est Strasbourg. Au lendemain de sa création, l'Université partage alors avec la ville la longue et désastreuse période de la Guerre de Trente Ans, avec ses destructions, pestes et famines. Bien que les effectifs étudiants – originaires surtout d'Alsace et des pays germaniques limitrophes – s'effondrent, la jeune Université s'efforce de maintenir la tradition de la Haute-École d'ouverture sur toute l'Europe savante alors en pleine effervescence intellectuelle.

En ces premières décades du 17<sup>e</sup> siècle, nous sommes au moment des travaux de KEPLER et de GALILÉE, créateurs de la physique moderne, avec sa méthode fondée sur l'observation expérimentale et une construction théorique mathématisée. Cette mutation dans l'approche de la

connaissance de la nature et, en particulier, le rôle nouveau des mathématiques en astronomie et physique, sont progressivement enregistrés par les professeurs de l'Université : « la mathématique nous fournit les ailes vers le ciel » écrit L. Th. WALLISER dans la présentation des programmes d'enseignement en 1621 (10). En s'appuyant sur la vocation strasbourgeoise d'imprimerie et de diffusion intellectuelle par le livre, M. BERNEGGER publie dès 1619, un *Manuale Mathematicum* avec les premières tables trigonométriques destinées aux étudiants allemands des sciences de la nature, de l'astronomie et de l'optique ; dans le même esprit, J. BARTSCH publie en 1631 des *Tabulae Manuales Logarithmicae*, résultats d'une collaboration avec son beau-père KEPLER en vue de mettre la récente invention des logarithmes de NEPER au service des moyens de calcul de l'astronomie (11).



Mathias BERNEGGER (1582-1640)

Professeur influent des débuts de l'Université. Ami de KEPLER, traducteur de GALILEE, il propose d'accorder l'enseignement aux idées nouvelles.

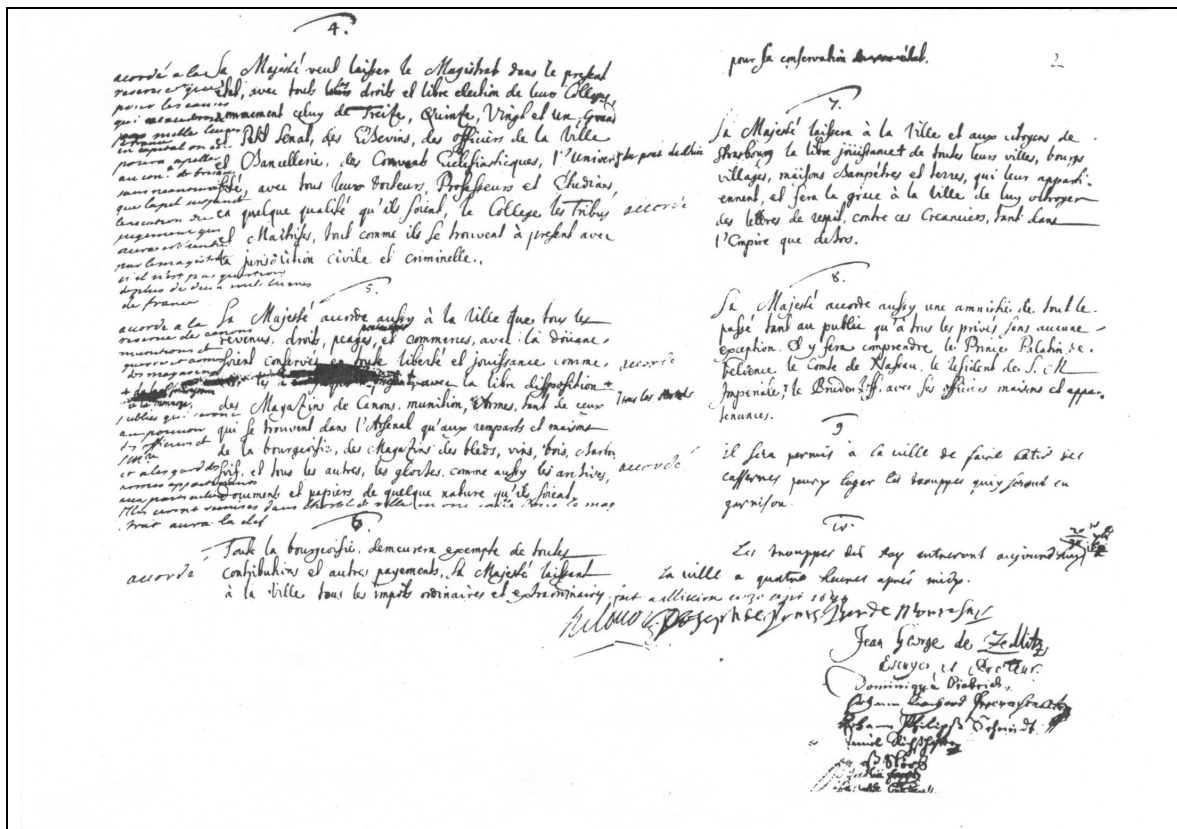
La figure marquante de l'Université à cette époque est Mathias BERNEGGER (1582-1640). D'origine autrichienne, il est appelé pour la chaire d'histoire et d'éloquence (9) ; s'établissant à Strasbourg, il devient recteur de l'Université et notable de la ville qui choisira plus tard l'un des fils comme ammeister. Auteur historien et mathématicien, il s'intéresse activement aux progrès contemporains dans tous les domaines culturels et entretient une correspondance suivie avec les plus grands savants européens de son temps. BERNEGGER jouera ainsi un rôle essentiel pour la diffusion des idées nouvelles dans le monde germanique et universitaire. Ami de KEPLER, il suit de près l'évolution des travaux de l'astronome de Prague. Mais il se distingue surtout par son travail de traduction et de publications rapides des œuvres de GALILÉE qu'il commence dès 1612 avec le *Traité sur le Compas géométrique et militaire* écrit en 1608. La version latine des *Dialogues sur les deux Systèmes du*

*Monde*, parus en italien à Florence en 1632, est ainsi publiée à Strasbourg en 1635, sous le titre *Systema cosmicum, auctore Galileo Galilei*. En 1636, BERNEGGER publie aussi pour la première fois, toujours à Strasbourg, la fameuse *Lettre à la Grande-duchesse Christina*, où GALILÉE précise ses conceptions sur les relations entre les sciences de la nature et la Bible : « ... il me semble que dans la discussion des problèmes naturels, nous ne devrions pas partir de l'autorité de passages de l'Écriture, mais d'expériences sensibles et de démonstrations nécessaires ... » (13).

Mettre sans tarder ces textes de GALILÉE à la portée du public cultivé et de l'enseignement universitaire est, pour BERNEGGER, le moyen de rompre avec la tradition scolastique et de s'engager dans une voie résolument moderne. Il illustre ainsi la situation spirituelle de son université et de sa ville à cette époque de guerre civile européenne, conclue par les traités de Westphalie (1648).

# L'UNIVERSITÉ ROYALE FRANÇAISE (18<sup>e</sup> siècle)

Une seconde ère de l'Université de Strasbourg commence vers la fin du 17<sup>e</sup> siècle et se termine à la Révolution française (1-3). En 1681, Louis XIV annexe Strasbourg. L'ancienne Ville-libre impériale et son Université, de tradition protestante et germanique, subissent alors la ferme tutelle du Très-catholique Roi de France. Tout en acceptant, dans le traité, le maintien de l'essentiel des droits du Gymnase et de l'Université protestante, Louis XIV implante, en face, un Collège Royal et une Université épiscopale qui, sous la direction des Jésuites français, doivent assurer les influences catholique et française. Cette Université catholique garde le titre honorifique de celle créée par le Pape en 1618 à Molsheim, mais ne comporte que les deux facultés des Arts et de Théologie. Pendant tout le 18<sup>e</sup> siècle, elle privilégiera la formation de cadres catholiques dans le loyalisme au royaume de France et des prêtres du diocèse de Strasbourg. Mais son audience restera quantitativement et qualitativement limitée en comparaison avec l'Université protestante qui, après une période d'adaptation au nouveau régime, retrouvera un rayonnement européen.



L'article 4 du traité d'Illkirch (30 septembre 1681) où la ville de Strasbourg « reconnaît sa Majesté Très-Chrétienne pour son souverain seigneur et protecteur »

Sa Majesté veut laisser le Magistrat dans le présent état avec tous ses droits et libre élection de leur Collège, nommément celui des Treize, Quinze, Vingt et un, Grand et Petit Sénat, des Echevins, des Officiers de la ville et chancellerie, des couvents ecclésiastiques, l'Université avec leurs docteurs, professeurs et étudiants, en quelque qualité qu'ils soient, le collège, les tribus et maîtrises, tous comme ils se trouvent, avec la juridiction civile et criminelle.

Cette clause permet de sauvegarder les particularismes de la tradition universitaire strasbourgeoise, ses liens étroits avec la ville, son ouverture vers l'espace européen et son inspiration protestante. À la veille de la Révolution, un siècle plus tard, l'article sera rappelé par le Magistrat de Strasbourg dans le Cahier des doléances du Tiers-état (19).

### ***Une transition maîtrisée***

Profitant d'une durable stabilité politique, avec le soutien attentif de la ville, l'Université protestante se transforme pendant le siècle des Lumières en un haut-lieu de rencontre culturelle des mondes français et germanique, catholique et protestant. Elle le doit à des personnalités comme l'historien et juriste J.D. SCHOEPFLIN (1694-1771), membre éminent du réseau intellectuel de l'Europe des Lumières, en correspondance avec les philosophes et savants les plus marquants, tels VOLTAIRE et d'ALEMBERT ; d'origine badoise, mais historiographe officiel de Louis XV, il sait utiliser ses relations administratives au plus haut niveau à Versailles pour tisser de solides liens intellectuels entre Strasbourg et Paris. L'Université bénéficie aussi de son parti-pris œcuménique, en attirant des étudiants de toutes les confessions et nationalités, même si les enseignants restent luthériens ; par ses pratiques trilingue (latin, allemand, français) et multiconfessionnelle, inspirée plus par l'Aufklärung allemande que par les Lumières françaises, l'Université « garde ses clients de l'Est et du Nord de l'Europe, tout en apparaissant comme l'Université principale de l'Allemagne du Sud-Ouest » (1) ; GOETHE et METTERNICH sont des exemples célèbres de ces étrangers venus étudier à Strasbourg. La renommée d'excellence de l'Université, en particulier dans les domaines de la médecine et du droit, est illustrée par l'avis du *Journal des Savants* en 1763, selon lequel la qualité des thèses strasbourgeoises est supérieure à celle des thèses parisiennes.

### ***La science newtonienne à Strasbourg***

Toute cette période, entre le 17<sup>e</sup> siècle finissant et le 18<sup>e</sup> siècle, est aussi celle où se développe la révolution scientifique issue des *Principia (Principes mathématiques de la Philosophie naturelle)* de NEWTON (1687). Par nature, l'institution universitaire, dont la tâche essentielle est d'enseigner le savoir bien établi, n'est pas spontanément révolutionnaire ; les foyers d'innovation où se forge le paradigme fondé sur la nouvelle physique mécaniste et mathématisée, avec le profond changement de vision du monde qui l'accompagne, sont ailleurs, dans les Académies créées pour l'occasion à Londres (1660), Paris (1666), Berlin (1700), Saint-Petersbourg (1726) ... ; les universités suivent la mutation épistémologique avec retard, même si certains des enseignants, correspondants et membres des académies y contribuent, à titre individuel, par leurs recherches personnelles. Tel est le cas aussi à Strasbourg : ni à l'Université protestante, ni *a fortiori* à l'Université épiscopale, la physique bénéficie d'un traitement spécifique et autonome : elle est enseignée en Faculté de philosophie puis en Faculté de médecine sans démarcation précise avec l'astronomie et les mathématiques d'une part, avec les sciences naturelles et la médecine d'autre part. Conformément à l'usage alors répandu, l'astronomie et l'observatoire sont régulièrement confiés au titulaire de la chaire de mathématiques à l'Université protestante. Quant à la chaire de physique elle est – dès son premier titulaire J.R. SALTZMANN (1574-1656), fondateur du Jardin botanique – attribuée à un médecin comme marchepied vers une chaire de « chimie, botanique et *materia medica* » auréolée d'un prestige tout particulier à cette époque (6).

Dans le mouvement d'élaboration de la physique newtonienne qui suit la publication des *Principia*, les mathématiques, la mécanique et l'astronomie sont indissociables. L'application des lois du mouvement aux systèmes matériels ponctuels puis continus et aux corps célestes nécessite la création des outils de l'analyse mathématique : équations différentielles simples et aux dérivées partielles, calcul des variations ... Les grandes figures sont ici les membres de la famille bâloise des BERNOULLI, liés à l'Académie de St-Petersbourg, leur élève EULER (St-Petersbourg et Berlin) ainsi que les Français d'ALEMBERT, LAGRANGE et LAPLACE. D'intéressantes contributions à ce courant viennent également de Strasbourg au 18<sup>e</sup> siècle finissant. Parmi d'autres, il convient de relever l'œuvre de Louis François Antoine ARBOGAST (1759-1803) (11,14). Son *Mémoire sur la nature des fonctions arbitraires qui entrent dans les intégrales des équations aux dérivées partielles* est couronné en 1789 par un prix de l'Académie de St-Petersbourg ; toute l'importance des *Essais sur les nouveaux principes de calcul différentiel et intégral ...*, communiqués à l'Académie des sciences en 1789, est soulignée par LAGRANGE dans l'introduction de sa classique *Théorie des fonctions analytiques*

(1798) ; en 1800, ARBOGAST publie à Strasbourg son œuvre capitale, intitulée *Calcul de dérivation*, qui est considérée comme l'une des sources du calcul opérationnel. Le mathématicien strasbourgeois s'illustre aussi dans une action emblématique du nouvel âge scientifique où l'expérimentation doit disposer de règles métrologiques universelles ; député à la Convention Nationale et rapporteur du Comité d'Instruction publique, il fait voter en 1793 la loi introduisant le système métrique sur l'ensemble du territoire national : « l'uniformité des poids et mesures était depuis très longtemps un des vœux des philanthropes ; elle est réclamée à la fois par les sciences et les arts ... » dit-il dans son rapport (11).

L'impact des *Principia* est maximal en astronomie et géodésie : la dynamique et la loi de gravitation newtoniennes fournissent désormais les explications et prévisions théoriques pour les observateurs avides de parfaire l'image du monde esquissée par COPERNIC, KEPLER, GALILEE et NEWTON, avec toute la portée pratique des nouvelles connaissances pour les circulations navale et terrestre. D'où l'essor des observatoires, tel l'Observatoire de Paris fondé par COLBERT comme laboratoire associé à l'Académie des Sciences (1667) ; il est dirigé par J.D. CASSINI qui se distingue par ses recherches sur les planètes et leurs satellites ; c'est aussi de cet Observatoire qu'est sortie l'entreprise de la mesure des dimensions terrestres, nourrie par les discussions sur la forme du globe. L'équivalent anglais, d'importance comparable, fonctionne dès la même époque à Greenwich sous la houlette d'Astronomes-royaux prestigieux : E. HALLEY, contemporain de NEWTON et spécialiste des comètes ; J. BRADLEY qui met en évidence l'aberration des étoiles fixes ; W. HERSCHEL, découvreur d'Uranus ... Parmi la multitude d'observatoires plus modestes, l'Université de Strasbourg a installé le sien en 1673 sur la Tour de l'Hôpital, où il servira jusqu'en 1792 (12). Le mathématicien astronome local Jean Gaspard EISENSCHMIDT (1656-1712) publie en 1691 son

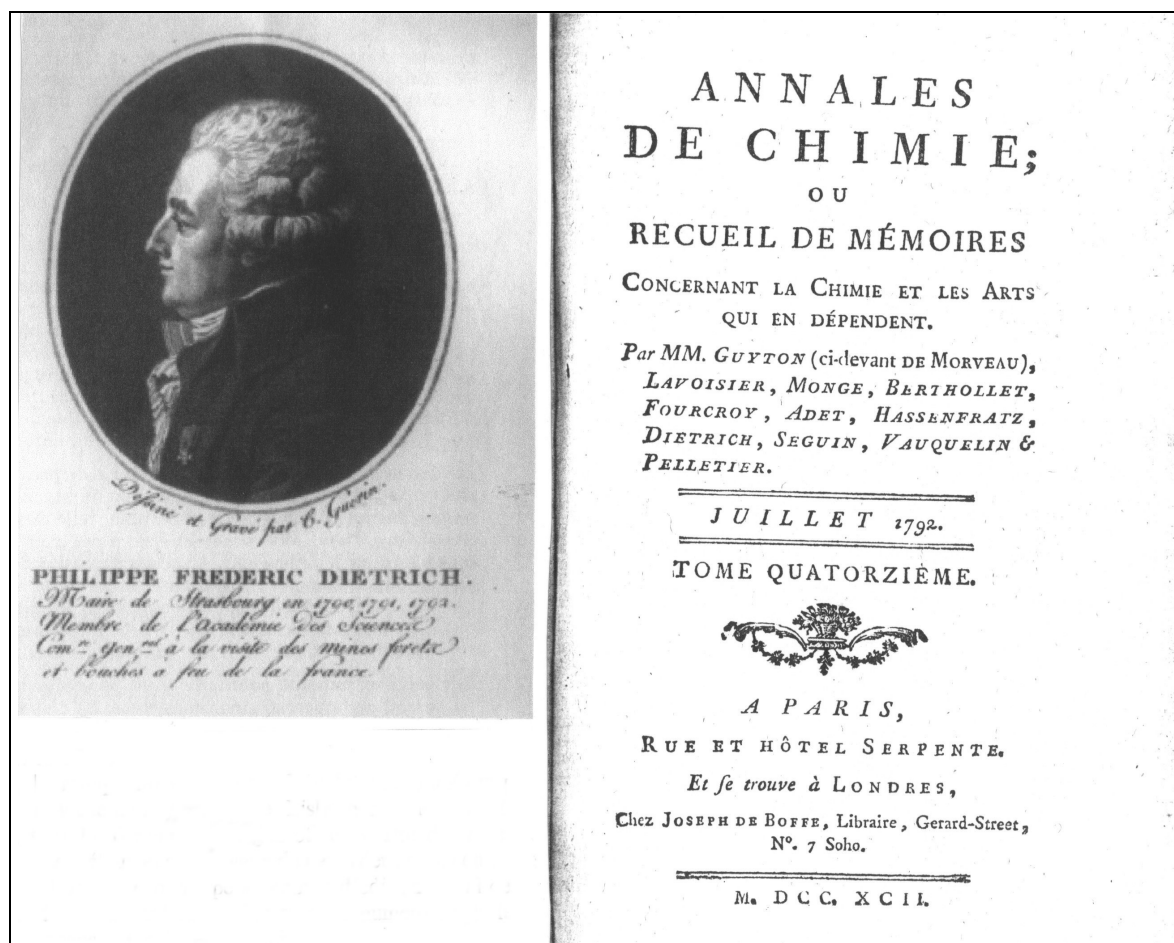
*Diatribes de figura telluris elliptico-spheroides*, où il soutient que la terre a la forme d'un ellipsoïde allongé selon l'axe des pôles alors que l'orthodoxie newtonienne prévoit une forme aplatie (6) ; cette hypothèse, qu'il partage avec CASSINI, sera invalidée lors des importantes expéditions géodésiques à l'Equateur et au Cercle polaire, qu'elle aura cependant contribué à susciter. Au 18<sup>e</sup> siècle, deux autres astronomes de l'Université méritent d'être mentionnés : Chrétien KRAMP (1760-1826) et Jean Louis Alexandre HERRENSCHNEIDER (1760-1843) ; en contact régulier avec leurs collègues les plus renommés français (LALANDE, LAPLACE, ...), anglais (HERSCHEL) et allemands, ils s'imposent par leur habileté dans la nouvelle pratique astronomique, fondée sur des observations et calculs minutieux, tels ceux consacrés à *L'éclipse du soleil du 7 septembre 1820 à Strasbourg et 25 autres villes européennes*. Pris dans la tourmente révolutionnaire, KRAMP émigre en Allemagne et rédige son ouvrage *Analyse des réfractions astronomiques et terrestres* dans lequel il étudie les propriétés de diverses fonctions eulériennes, introduit la notation  $n!$  pour les factorielles et dresse, avant LAPLACE, des tables à huit décimales pour l'intégrale de LAPLACE-GAUSS (8) ; pour sa part, HERRENSCHNEIDER est, comme ARBOGAST, entraîné par l'action politique à Paris, où il est membre de la Commission des Poids et Mesures et du jury d'examen de la toute nouvelle École Polytechnique.

Pendant les dernières décades du 18<sup>e</sup> siècle, alors que s'achève la mise en place du paradigme mécaniste newtonien, présenté dans des ouvrages tels que la *Mécanique analytique* de LAGRANGE (1788) et la *Mécanique céleste* de LAPLACE (1799), une autre révolution scientifique est en cours.

### **La révolution lavoisienne**

Associée à la figure de A.L. LAVOISIER, cette mutation épistémologique concerne les domaines de la matière et de la chaleur où, en rupture avec les anciennes visions aristotélicienne et alchimique, émergent des conceptions physico-chimiques modernes (15-17). Le projet de LAVOISIER – qui se dit physicien – est d'importer en chimie les méthodes quantitatives de la physique expérimentale faisant appel à une instrumentation de précision (balances, calorimètres, gazomètres ...). Admettant le

principe de conservation de la quantité de matière, il établit le bilan dans les réactions chimiques par des manipulations systématiques de pesée.



Philippe Frédéric de DIETRICH (1748-1793)

Scolarque de l'université et maire, il participe aux débuts de la Révolution à Strasbourg.

L'imagination populaire le connaît accueillant Rouget de Lisle quand il crée *La Marseillaise*. En décembre 1893 sous la Terreur, il est guillotiné. Maître de forges, Dietrich s'intéresse à la combustion des métaux et aux travaux de Lavoisier ; avec celui-ci et d'autres adeptes de la « nouvelle chimie », il participe au comité d'édition initial des *Annales de chimie*. La publication du journal est suspendue après le numéro de juillet 1792 et ne reprendra qu'en 1797, mais sans Lavoisier et Dietrich.

L'analyse utilise le concept de corps simples, constituants de la variété de substances chimiques en jeu, identifiés et répertoriés dans une nomenclature précise. Tel est le programme de la nouvelle science que LAVOISIER expose dans son *Traité élémentaire de chimie* (1789), considéré généralement comme le texte fondateur de la chimie moderne.

En pratique, les interrogations critiques sur l'ancien système d'ARISTOTE des quatre éléments suscitent naturellement des recherches sur la composition de l'air, de l'eau et sur la nature de la combustion ... LAVOISIER, pour sa part, par la conduite méthodique de son programme d'expériences et le réexamen des résultats de ses prédécesseurs, tels J. PRIESTLEY et K.W. SCHEELE, établit le rôle central de l'oxygène et invalide la théorie du phlogistique qui régit la chimie « normale » depuis le milieu du 18<sup>e</sup> siècle. Mais ce nouveau point de vue ne s'imposera que progressivement, après une âpre résistance des partisans du phlogistique ; pour contrer l'obstruction de ses adversaires, LAVOISIER est ainsi conduit à créer, avec quelques collègues, les *Annales de*

*chimie*, dont la diffusion sera rapide en France et en Angleterre. Dans toute cette aventure, les savants strasbourgeois ne sont pas absents.

Ainsi Frédéric EHRMANN (1741-1801), « démonstrateur de physique expérimentale », multiplie les expériences avec les diverses sortes d'« airs » de la chimie pneumatique de l'époque (18). En 1870, il publie ses études sur quelques *Lampes à air inflammable*, i.e., l'hydrogène découvert par H. CAVENDISH en 1766. Puis il fait ses essais au chalumeau à l'oxygène, connu comme « l'air du feu ou air vital » depuis les travaux de SCHEELE ; son mémoire, rédigé en allemand, est remarqué par LAVOISIER qui le fait traduire et publier par l'Académie des Sciences en même temps que l'une de ses propres contributions sur le même sujet, sous le titre *Essai d'un art de fusion à l'aide de l'air du feu ou air vital* (1787). Encore plus proche de LAVOISIER, nous apparaît Frédéric de DIETRICH (1748-1793), maire de Strasbourg, ancien scolarque de l'Université, industriel et savant, qui, engagé dans l'action révolutionnaire, périra lui aussi guillotiné sous la Terreur. Alors que LAVOISIER mûrit son œuvre en contact direct avec ses concurrents anglais, dont PRIESTLEY, il connaît mal les contributions rédigées en allemand, de SCHEELE, dont la découverte de l'oxygène (1771, publiée en 1777) est pourtant antérieure ; c'est après la traduction par DIETRICH du *Traité chimique de l'air et du feu* du savant suédois en 1781, que LAVOISIER reconnaîtra toute la portée de ses travaux. DIETRICH fait aussi partie du groupe éditorial à l'origine des *Annales de chimie* où, fidèle à la tradition de sa ville et de son Université, il entend assurer l'ouverture vers le monde scientifique allemand : « Les *Annales* présentent un moyen de suppléer au peu de connaissance que l'on a généralement en France de la langue allemande ... » (19).

Dans un tour d'horizon de la physique en Alsace au 18<sup>e</sup> siècle, il faudrait encore mentionner le mulhousien – alors suisse – Johann-Heinrich LAMBERT (1728-1777) logicien, mathématicien, physicien et philosophe, l'un des principaux savants du Siècle des Lumières ; mais on ne peut l'associer à Strasbourg car il a exercé l'essentiel de son activité en Allemagne, à l'académie de Berlin notamment.

## L'UNIVERSITÉ NAPOLEONNIENNE (19<sup>e</sup> siècle)

À l'aube du 19<sup>e</sup> siècle, avec la révolution industrielle qui se propage de l'Angleterre sur le continent, les États-nations veulent affirmer leur puissance par le développement scientifique et technique ; ce qui les conduit à réformer leurs systèmes d'enseignement. Deux modèles d'enseignement supérieur très différents sont alors proposés par la France révolutionnaire et l'Allemagne prussienne (19-22). L'institution strasbourgeoise est intégrée dans le système centralisé et uniforme de l'Université impériale, qui sera maintenu sans changement notable par tous les régimes jusqu'à la défaite de 1870. Ce nouvel ordre est en rupture brutale avec la tradition de l'Université de Strasbourg, ses liens étroits avec la ville, son inspiration luthérienne, son ouverture européenne vers l'espace germanique. Bien qu'atténués, ces particularismes restent cependant présents dans l'esprit universitaire local, observateur privilégié de l'Université humboldtienne chez les voisins allemands.

### *Réformes de l'enseignement supérieur*

Le changement du système universitaire par la France révolutionnaire est radical : en 1793, la Convention abolit toutes les universités, puis crée un ensemble de grandes Écoles pour former les élites nécessaires à la Nation dans les domaines sensibles : École Polytechnique, École Normale, Conservatoire des Arts et Métiers, ... Ensuite, en 1806, Napoléon instaure l'Université impériale, une et centralisée, entièrement soumise à son service (20). Le pays est divisé en académies dans lesquelles ne subsistent que des facultés. Les traditionnelles facultés professionnelles de médecine, de droit et, éventuellement, de théologie sont maintenues. Mais le rôle de l'ancienne faculté de philosophie est redéfini en introduisant les nouvelles facultés de lettres et de sciences ; le but de celles-ci n'est plus l'élaboration et la transmission au plus haut niveau de la connaissance : associées au lycée principal de l'académie, ces « facultés d'académie » ont une mission qui se limite à la collation des grades scolaires et universitaires (baccalauréat, licence, doctorat ...) ainsi qu'au contrôle de l'enseignement des lycées. L'enseignement de niveau supérieur et la recherche de valeur sont réservés à l'autre pôle du système français d'enseignement supérieur entièrement localisé dans la capitale, constitué par les grandes Écoles et le Collège de France. Dans les domaines scientifiques, lors des premières décades du siècle, la part essentielle revient à l'École Polytechnique.

Ce sont les premières générations de savants qu'elle a abritées qui sont à l'origine de l'extraordinaire poussée créatrice de la physique classique : prolongeant la tradition de la

physique mathématique élaborée pour la mécanique (LAGRANGE, LAPLACE), la mathématisation s'étend aux domaines de l'électricité et du magnétisme (LAPLACE, POISSON, AMPERE ...), de l'optique (MALUS, BIOT, FRESNEL), de la chaleur (FOURIER, S. CARNOT ...), qui deviennent ainsi des sciences exactes ; de même, l'autre grand programme, celui de LAVOISIER, réactivé par les récentes hypothèses atomistes de DALTON, est poursuivi sous la direction de BERTHELOT et de GAY-LUSSAC ; celui-ci, dans son laboratoire privé, réalise les travaux physico-chimiques qui précisent l'équation d'état des gaz et imposent la loi d'AVOGADRO-AMPERE, dans une ligne de recherche qui élucidera progressivement les notions d'atomes et de molécules.

Ce brillant début en France est suivi d'un relatif déclin dès la seconde moitié du siècle, où l'Université allemande affirme son influence (15). Le système universitaire dont se dote l'espace germanique à la même époque est très différent dans la forme et l'esprit de l'Université napoléonienne (21,22). Le modèle est l'Université fondée en 1810 par W. von HUMBOLDT à Berlin, capitale de l'État prussien, lequel conduit le mouvement d'unification nationale et la montée en puissance de l'Allemagne au 19<sup>e</sup> siècle. Pour son fondateur, l'Université, « sommet spirituel de la nation », doit rester fidèle au principe de *libertas philosophandi*, où l'union recherche-enseignement est réalisée dans « le silence et la liberté ». Plutôt que « l'état-enseignant » c'est « la connaissance-enseignante » qui doit être mise en œuvre

dans un réseau équilibré d'établissements autonomes, soumis aux mêmes règles et bénéficiant d'avantages comparables, pour leur permettre à chacun de développer des approches originales de recherche, d'enseignement et de formation professionnelle. Dans les divers instituts spécialisés, l'activité universitaire a lieu en cultivant un contact direct entre le chercheur-enseignant expérimenté et l'étudiant en formation, lors des séminaires de recherche, informels mais exigeants, et de travaux dirigés dans des laboratoires systématiquement équipés pour allier mesures précises, enseignement de terrain et applications technologiques ; le laboratoire de chimie de J. von LIEBIG, ancien élève de GAY-LUSSAC, à Giessen (1826), les laboratoires de physique de G. MAGNUS à Berlin (1843), de R. BUNSEN et G. KIRCHHOFF à Heidelberg (1848) ainsi que de W. WEBER à Göttingen (1850) sont les modèles qui seront largement suivis dans l'Allemagne prussienne de la seconde moitié du siècle. Dès cette époque, l'efficacité de l'Université humboldtienne est manifeste. Elle devient une référence à suivre : la vieille Angleterre et les jeunes Etats-Unis d'Amérique y chercheront leur inspiration ; en France aussi, ses mérites sont soulignés dans toutes les critiques et propositions de réforme de notre système universitaire surtout après la défaite de 1870 (20).

### ***La Faculté des Sciences de Strasbourg***

À Strasbourg, le système napoléonien des facultés académiques est officiellement inauguré en 1811 (19). Tant des points de vue thématique que géographique, l'unité universitaire est désormais brisée : le nouvel ordre met fin à la traditionnelle et souvent fructueuse cohabitation des sciences physiques et mathématiques avec la philosophie et la médecine ; la Faculté des sciences côtoie celle de droit à la Krutenau dans les locaux des Enfants Trouvés, qui deviennent l'Hôtel de l'Académie ; quant aux Facultés de médecine et de théologie protestante, elles sont respectivement accueillies à l'Hôpital Civil et à la fondation Saint-Thomas. Cependant, les professeurs nommés sont souvent des survivants de l'ancienne Université qui, malgré le cadre étriqué de leur mission de « machine à examens » et d'encadrement de la société française, cherchent à rester fidèles à leur idéal de culture désintéressée, d'ouverture européenne, héritée de l'Aufklärung.



*L'Hôtel de l'Académie au 19<sup>e</sup> siècle. C'est le siège de la Faculté des sciences et des physiciens jusqu'à l'édification des bâtiments actuels de l'Institut de physique (1882). Avec l'avènement de l'Université napoléonienne, l'Académie de Strasbourg est d'abord installée au Grand-Séminaire (1808) puis exilée hors du centre historique, à la Krutenau (1828).*

Tel est notamment le cas, dans la Faculté des sciences mathématiques et physiques, de Ch. KRAMP, nommé doyen et professeur de mathématiques, ainsi que de J.L.A. HERRENSCHNEIDER, nommé professeur de physique mathématique et expérimentale. Ces personnalités expérimentées et bien intégrées à la communauté savante européenne ont le souci de maintenir localement la qualité de l'union recherche enseignement, malgré les circonstances peu favorables. HERRENSCHNEIDER qui, par son action politique a contribué à instaurer le nouveau système, en juge les résultats à Strasbourg avec amertume : « O STURM, brave savant STURM ! ton ouvrage est bouleversé par la cupidité vandale d'une poignée d'hommes étrangers à la chose ! ... ». L'organisation jacobine réserve en effet l'excellence et le prestige scientifique au centre parisien, qui attire l'essentiel des moyens matériels et les plus doués des chercheurs enseignants au détriment de la province, même si les facultés de Strasbourg restent encore relativement privilégiées.

### ***Pasteur, physicien et stéréochimiste***

La figure marquante de toute cette époque universitaire à Strasbourg est Louis PASTEUR (1822-1895). Son parcours illustre pleinement les grandeurs et servitudes de l'organisation scientifique française du moment (14) : débutant à Paris, formé à l'École Normale Supérieure et dans le laboratoire de BALARD, il entame, après sa thèse (1847), une transitoire carrière provinciale (Strasbourg, Lille) avant d'être rappelé dans la capitale pour diriger les études scientifiques de l'École Normale (1857). Pendant son séjour strasbourgeois (1848-1854), tout en maintenant les relations avec les maîtres parisiens (BIOT, DUMAS), il fait connaissance avec les milieux industriels en Alsace et rencontre, par ses voyages, le monde scientifique allemand. Confronté à la pénurie locale des moyens expérimentaux, il prend la mesure de l'urgence d'un soutien convenable par l'État des laboratoires, ces « temples de l'avenir, de la richesse et du bien-être » ; dès son retour à Paris, c'est d'ailleurs par la création de laboratoires d'enseignement bien équipés qu'il contribuera au succès croissant de l'École Normale Supérieure au détriment de l'École Polytechnique plus frileuse sur ce point et qui déclinera après les brillantes premières décades du siècle (20).



Louis PASTEUR (1822-1895)

Professeur à la Faculté des sciences, en 1852. Autour du cou il porte le ruban avec la loupe qui lui a permis de distinguer les formes dextro- et lévogyres des cristaux de tartrates.

L'opération de recherche que réalise L. PASTEUR à Strasbourg est de nature physique ; mais son retentissement sera aussi considérable dans les domaines de la chimie et des sciences de la vie (15). Il utilise la polarimétrie, récemment mise au point par BIOT, pour étudier l'activité optique d'une substance-modèle et en caractériser la structure et la symétrie. Dans ses travaux de pionnier, BIOT avait montré que tout cristal optiquement actif est chiral et qu'il existe sous les deux formes dextro- et lévogyre. À la suggestion de BIOT, PASTEUR s'intéresse au cas énigmatique des solutions de tartrates dont, selon des études antérieures, certaines sont optiquement actives et d'autres sont neutres. En examinant au microscope les cristaux provenant d'une solution neutre, il découvre l'existence de deux formes dissymétriques avec des facettes orientées à droite ou à gauche ; après un tri manuel et une mise en solution, il vérifie que les solutions pures des deux formes ont des pouvoirs rotatoires en sens opposé et que les solutions mixtes à concentrations égales sont optiquement neutres. Il en conclut que les lois connues à l'échelle macroscopique pour les cristaux peuvent être étendues à l'échelle microscopique de molécules ; le pouvoir rotatoire des tartrates est donc lié à l'asymétrie chirale des molécules qui se présentent sous la forme d'isomères dextro- et lévogyres. En discutant la structure nécessairement tridimensionnelle de ces molécules asymétriques, il envisage les possibilités de groupements d'atomes hélicoïdaux ou aux sommets d'un tétraèdre irrégulier ; par cet aspect de son travail, PASTEUR est généralement considéré comme l'inventeur de la stéréochimie. Un quart de siècle plus tard, ses idées seront développées par le chimiste alsacien Achille LE BEL (1847-1930) qui postule l'asymétrie du carbone dans les composés organiques optiquement actifs (1874) et, avec

van't HOFF, précise la notion de structure tétraédrique de l'atome de carbone, dans le courant de pensée qui imposera la théorie atomique en chimie organique.

Les expériences strasbourgeoises de PASTEUR ont aussi une importante signification pour les sciences de la vie. Dans son travail, il remarque que, contrairement à ce qui est la règle au laboratoire, la nature préfère fabriquer des molécules optiquement actives sous l'une ou l'autre des formes seulement ; par divers moyens chimiques ou physiques, tel l'emploi d'un champ magnétique, il cherche vainement à reproduire ce que réalise le monde vivant. Plus tard, au début de ses recherches sur la fermentation, il vérifie directement l'efficacité de certains microorganismes dans une action sélective sur les isomères dextro- ou lévogyres. Pour PASTEUR, il en résulte « une ligne de démarcation profonde entre les produits organiques naturels et les produits artificiels ... ; au moment de leur formation, ... une influence secrète groupe dissymétriquement les atomes s'il s'agit d'une combinaison d'ordre vital ... C'est là, à mon sens ... un fait considérable qui touche aux conditions les plus cachées de la création et de la vie ». On sait que cette « asymétrie du vivant » reste actuellement un thème de recherche majeur.

### ***Gerhardt, pionnier atomiste***

Le successeur de L. PASTEUR à la Faculté des sciences de Strasbourg, Charles-Frédéric GERHARDT (1816-1856), est une autre figure marquante de l'Histoire des sciences (15). Chimiste, il intéresse aussi la physique à cause de son rôle crucial dans le développement de la théorie atomique.

Parfaitement bilingue, ce Strasbourgeois commence ses études en 1836 à Giessen, dans le prestigieux laboratoire de J. von LIEBIG – dont il traduira les œuvres. Puis il se rend à Paris, au laboratoire de DUMAS, où il passe sa thèse (1841). Il accepte ensuite un poste à Montpellier, où il se plaint de l'absence de moyens. De retour à Paris, en 1847, il fonde avec A. LAURENT une École de chimie pratique sur le modèle de l'Institut de Giessen. Enfin, en 1855, ayant le choix entre une chaire au Polytechnicum de Zürich et celle de chimie à Strasbourg, il choisit celle-ci - malheureusement pour peu de temps.

À l'époque d'activité de GERHARDT, les travaux de DALTON, GAY-LUSSAC, AVOGADRO et AMPERE n'ont pas encore suffi à dégager clairement les notions d'atome, plus petite partie susceptible d'entrer en combinaison, et de molécule, plus petite partie susceptible d'existence propre. Bien au-delà de la moitié du siècle, la chimie officielle, sous le magistère de J.B. DUMAS et de M. BERTHELOT, considère que la connaissance du « véritable » atome lui est inaccessible et, dans l'esprit positiviste alors dominant, se contente d'une description utilisant, non des poids atomiques, mais des « équivalents » directement induits par l'expérience. À contre-courant de ce système, dont il dénonce les incohérences, GERHARDT avec l'appui de LAURENT élabore son propre système présenté dans les quatre volumes de son *Traité de chimie organique*, publiés entre 1853 et 1856. Il introduit ainsi les notions modernes d'atome et de molécule et s'appuie sur la loi d'AVOGADRO-AMPERE et les densités de vapeurs moléculaires pour établir la table des poids atomiques qui est encore la nôtre.

À Paris, les thèses « atomistes » de GERHARDT seront violemment contestées par les « équivalentistes » autour de DUMAS et BERTHELOT, mais trouveront un ardent et influent partisan en Charles-Adolphe WÜRTZ (1871-1884), lui aussi strasbourgeois et élève de LIEBIG. Sur le plan international, le système de GERHARDT sera reconnu lors du Congrès de Karlsruhe en 1860, où ses mérites sont soulignés par l'italien S. CANNIZZARO. Il inspirera directement Lothar MEYER et Dimitri MENDELEYEV dans leur élaboration du tableau périodique des éléments ; par son impact, il marque un tournant décisif dans l'élaboration de la théorie atomique moderne (23).



Charles Frédéric GERHARDT (1816-1856) Charles-Adolphe WÜRTZ (1817-1884) Chimistes strasbourgeois, défenseurs de l'hypothèse d'Avogadro-Ampère, promoteurs de la théorie atomique en France.

La standardisation de la nomenclature chimique, basée sur la notation atomique, due aux GERHARDT, CANNIZZARO, WÜRTZ ... se traduira par un épanouissement de l'enseignement de la chimie, au service notamment de la formation des cadres de l'industrie chimique en train de décoller. À ce propos, il convient de mentionner le rôle essentiel joué à Mulhouse par les dirigeants industriels, regroupés dans la puissante Société industrielle, qui ont fait de la ville et de sa région une plate-forme européenne de l'industrie textile et des branches connexes : dès 1822, ils ont créé une filière d'enseignement scientifique à finalité professionnelle, comportant, depuis 1854, l'École des sciences appliquées, dirigée jusqu'en 1865 par Paul SCHÜTZENBERGER (1829-1897), chimiste formé à Strasbourg. En 1882, cette École servira de modèle pour l'École de physique et de chimie industrielle de Paris, avec le même SCHÜTZENBERGER comme premier directeur (24).

### ***Hirn, pionnier de l'équivalence mécanique de la chaleur***

Une autre préoccupation majeure du 19<sup>e</sup> siècle scientifique et technique concerne les phénomènes thermiques, la chaleur et son utilisation industrielle comme puissance motrice. La thermodynamique s'élabore progressivement en commençant par le second principe esquissé dans les *Réflexions sur la puissance motrice du feu* (1824) de S. CARNOT. Le premier principe se précise vers le milieu du siècle avec l'émergence du concept nouveau de l'énergie comme quantité fondamentale conservative pouvant prendre diverses formes, mécanique, thermique, électrique, chimique ... L'énoncé général du principe est dû à H. von HELMHOLTZ en 1847. Mais l'équivalence des formes mécanique et thermique de l'énergie est déjà explicitée en 1842 par J.R. MAYER ; et en 1843, J.P. JOULE annonce les premiers résultats de ses mesures de l'équivalent mécanique de l'unité de chaleur. À la même époque, le colmarien Gustave Adolphe HIRN (1815-1890) intervient de manière indépendante et originale dans cette œuvre collective (6, 14).



Gustave-Adolphe HIRN (1815-1890)

Industriel et savant, pionnier de l'équivalence mécanique de la chaleur, de la thermodynamique fondamentale et appliquée aux machines à vapeur.

G.A. HIRN n'a pas le profil typique du chercheur universitaire. Sa formation est essentiellement autodidacte, dictée par les besoins de sa profession d'ingénieur à laquelle l'université de l'époque prépare mal. Dans l'entreprise qu'il dirige avec son frère, HIRN dispose de cinq machines à vapeur dont deux avec une puissance d'une centaine de chevaux-vapeur : en ingénieur, il cherche à en augmenter l'efficacité ; en chercheur, il est l'un des premiers à étudier les phénomènes thermiques internes.

En analysant l'efficacité de la machine à vapeur (1854) – selon ce qui est toujours connu comme « l'analyse de HIRN » - il établit le premier bilan calorifique et souligne qu'il est avantageux d'opérer avec de la vapeur surchauffée, ce qui multiplie le rendement par quatre. Dans son étude de la chaleur  $\Delta Q$  mise en jeu et le travail  $\Delta W$  fourni, il montre que la vapeur d'eau injectée directement dans le condenseur produit plus de chaleur que celle qui vient de dépenser du travail en actionnant le piston ; il en tire une valeur approximative (3,9 joules/cal) de l'équivalent mécanique de la chaleur,  $J = \Delta W / \Delta Q$  (1847). Plus tard, suivant une méthode moins grossière, il utilise le choc d'une barre de plomb dont il mesure l'échauffement et le changement de volume pour en déduire que  $J = 4,17$  joules/cal (1858) ; cette valeur est proche de celle indiquée par JOULE en moyenne de l'ensemble de ses résultats entre 1840 et 1849, ainsi que celle,  $J = 4,18$  joules/cal admise de nos jours.

Dans ses recherches sur la conservation d'énergie sous ses formes thermique et mécanique, HIRN reprend aussi les réflexions de son prédécesseur MAYER : en 1842, cet auteur avait noté que, pour les gaz parfaits, la différence  $c_p - c_v$  des chaleurs spécifiques à pression et à volume constants sert à produire du travail. Ceci signifie que  $J(c_p - c_v) \Delta T = \Delta W$ , si  $\Delta W$  et  $\Delta T$  représentent respectivement le travail produit et l'élévation de température en chauffant le gaz de masse unité ; compte tenu de la loi des gaz parfaits  $pV = RT$ , on en tire la « relation de MAYER » :  $J(c_p - c_v) = R/M$  ( $R$  : constante des gaz

parfaits,  $M$  : masse molaire). HIRN est ainsi conduit à s'intéresser à des mesures calorimétriques avec une attention particulière pour le rapport  $\gamma=c_p/c_v$  ce qui, avec les valeurs faciles à mesurer de  $c_p$ , lui donne les valeurs de  $c_v$  très difficiles à déterminer directement. HIRN est aussi amené à proposer comme correction de l'équation des gaz parfaits, l'expression  $(p+\pi)(v-b)=RT$  où  $\pi$  est une « pression intérieure » constante et  $b$  le « volume réel » des molécules ; il s'agit là d'un pas vers la future équation de van der WAALS (1873), où  $\pi=a/v^2$  n'est plus constante.

Dans son activité scientifique, HIRN est bien intégré dans la communauté internationale concernée : affilié à de nombreuses académies, il publie régulièrement dans des revues françaises (Comptes rendus de l'Académie des sciences, Bulletin de l'Académie Royale de Belgique), mais reçoit aussi un prix de la *Physikalische Gesellschaft von Berlin* (1857). En 1862, il fait paraître à Paris son *Exposition analytique et expérimentale de la théorie mécanique de la chaleur*, qui est l'un des tout premiers traités de thermodynamique présentés en France. Au-delà de la communauté proprement scientifique, HIRN s'adresse aussi au monde des ingénieurs et industriels, qui lui est naturellement proche, en particulier par ses publications régulières au *Bulletin de la Société industrielle de Mulhouse*. Il participe enfin à l'intense activité de communication et d'information – traduite par l'essor local des Sociétés savantes de l'époque – au service du public cultivé, généralement autodidacte, avide de connaissances sur les progrès scientifique et technique : dès sa création (1860), HIRN anime la *Société d'histoire naturelle de Colmar* et, par ses écrits de physique, climatologie et météorologie, contribue à faire du Bulletin de la Société un journal scientifique de qualité. Après l'annexion allemande (1871), il reste à Colmar mais continue à publier à Paris : *Thermodynamique* (1881), *La vie future et la science moderne* (1882), *Constitution de l'espace céleste* (1889).

Dans le cas de HIRN, le support de l'innovation scientifique n'est pas le potentiel de recherche-enseignement des facultés de l'Université de France, mais les moyens d'origine privée, mis en œuvre par la dynamique industrielle locale. Cet exemple met en évidence les faiblesses de l'organisation universitaire française dont la rigidité et l'inertie sont peu adaptées au rapide progrès scientifique et industriel qui est l'enjeu capital dans la compétition internationale au 19<sup>e</sup> siècle. Par contraste, le rôle éminent joué par l'Université humboldtienne dans la montée en puissance de l'Allemagne prussienne est souligné régulièrement à l'occasion de missions spéciales envoyées outre-Rhin (e.g., V. COUSIN, 1834 ; C.A. WÜRTZ, 1868 ; E. BOUTROUX, 1869) ; ce n'est cependant qu'après la défaite de 1870 que la III<sup>e</sup> République fournira un réel effort de rénovation (8).

Mais Strasbourg sera alors sous administration allemande dans une Alsace-Lorraine devenue *Reichsland* germanique

## L'UNIVERSITÉ ALLEMANDE DE STRASBOURG (1872-1918)

La paix de Francfort (mai 1871) ouvre la période d'un demi-siècle (1871-1917) d'intégration de l'Alsace et du département de la Moselle à l'Empire wilhelminien qui incarne désormais l'unité nationale de l'Allemagne (1,2).

Pour les meilleurs esprits du nouvel État-nation, cette annexion est légitime puisque, par son origine ethnique, ses traditions culturelle et linguistique, l'Alsace-Lorraine participe au même *Volksgeist* que les autres pays allemands. Mais on connaît la réponse de D. FUSTEL DE COULANGES – professeur à la ci-devant Faculté de lettres et, par ailleurs, admirateur de l'Université humboldtienne – à son collègue historien Th. MOMMSEN : « L'histoire vous dit peut-être que l'Alsace est un pays allemand, mais le présent vous prouve qu'elle est un pays français ! ... Ce n'est ni la race ni la langue qui fait la nationalité, mais la volonté » (19). Dans ce qui est devenu le *Reichsland*, la mise en tutelle, avec ses dures dispositions de germanisation, est effectivement vécue au début comme un traumatisme : l'émigration en France est très importante en particulier dans les milieux les plus actifs, impliqués dans les développements intellectuel, économique et industriel ; pour la population qui reste sur place, l'Allemand est surtout l'occupant étranger qu'il faut traiter selon le mot d'ordre « Protestation et Abstention ». Plus tard, au tournant du 20<sup>e</sup> siècle, la vie commune s'organise avec l'importante communauté émigrée des « vieux-allemands », cadres administratifs, militaires et universitaires, dans une entente où les « vieux-alsaciens » affirment leur particularisme et recherchent l'autonomie à l'égal des autres États dans l'Empire.

Pour Strasbourg, capitale du *Reichsland* et ville historique prestigieuse, le pouvoir impérial veut « restaurer l'essence allemande en un lieu de vieil épanouissement culturel allemand ». Cette volonté se traduit par un ambitieux programme d'extension de la ville et par la création d'une université moderne, dotée de moyens importants, destinés à être une vitrine du prestige de l'Allemagne prussienne (25).

### ***Un modèle strasbourgeois pour l'Université impériale***

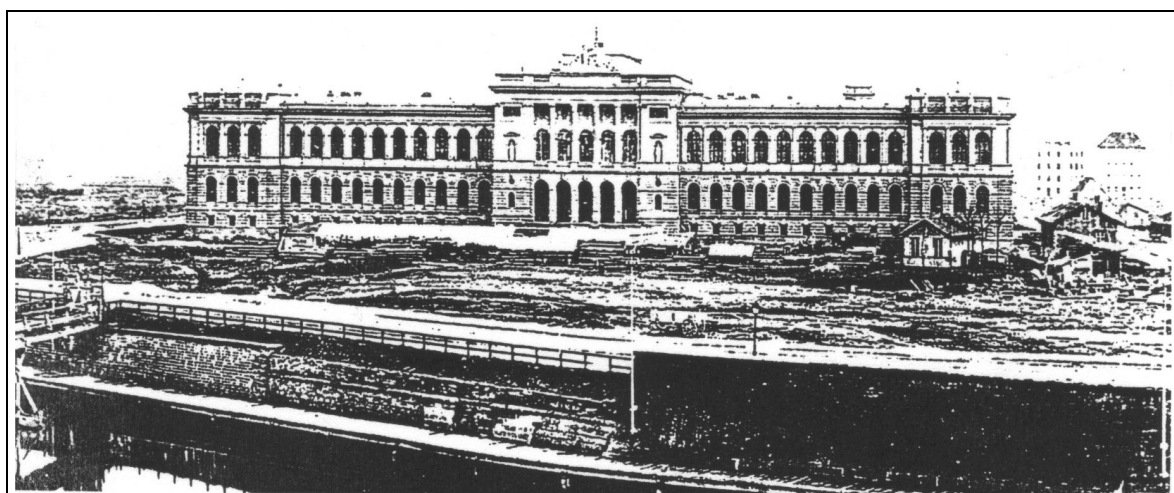
L'avènement de l'Allemagne en tête des puissances industrielles du moment consacre avant tout l'efficacité du système d'enseignement fondé par von HUMBOLDT et développé systématiquement au cours du 19<sup>e</sup> siècle par les Allemands. « Dans leurs écoles technologiques et leurs universités, le progrès ne devait attendre ni le génie occasionnel ni l'illumination fortuite. Au 19<sup>e</sup> siècle, leurs prouesses d'érudition suscitèrent l'admiration du monde entier. Cette discipline du savoir s'applique, au-delà de la technologie, et au-delà de la science à l'érudition générale. Elle représente la transition de l'amateurisme au professionnalisme » (A.N. Whitehead). Pour l'État nouveau, ayant réalisé son projet interne d'unification nationale, l'objectif est dorénavant de s'imposer à l'extérieur dans le concert des puissances mondiales. Le moyen indispensable pour y parvenir reste l'innovation et le développement industriels, induits par une relance des progrès scientifique et technique. Il faut alors, en toute priorité, renouveler et renforcer l'organisation universitaire de l'Empire, en augmentant la capacité d'accueil d'étudiants, en ajustant les locaux et moyens des laboratoires et bibliothèques aux conditions de travail modernes de formation d'enseignants et de formation professionnelle par la recherche scientifique. Dans l'esprit du pouvoir impérial, la *Kaiser-Wilhelm-Universität Strassburg* destinée au *Reichsland*, doit être le fer de lance de la réforme universitaire et servir de modèle pour les autres universités allemandes (25,26).

La réalisation de ce « modèle strasbourgeois » est confiée au badois von ROGGENBACH, homme politique expérimenté, qui s'entoure d'un groupe de pilotage constitué de hauts-fonctionnaires prussiens et de professeurs de renom.

L'Université impériale de Strasbourg est inaugurée le 1<sup>er</sup> mai 1872 ; elle comprend, en plus des traditionnelles Facultés de théologie, droit, médecine et philosophie, une Faculté nouvelle de

mathématiques et des sciences de la nature, dont la valorisation correspond aux enjeux en cours. Pendant toute une période transitoire (1872-1884), le centre administratif est le Château des Rohan ; les lieux d'enseignement sont, pour l'essentiel, les locaux dispersés et souvent vétustes utilisés par l'Université française. La Faculté de mathématiques et des sciences de la nature, avec les physiciens, commence ainsi ses activités à l'Hôtel de l'Académie de la Krutenau.

Pour répondre à toutes les ambitions du pouvoir impérial, la construction des nouveaux bâtiments universitaires doit d'abord s'intégrer dans le projet d'extension de la ville : celle-ci verra tripler sa superficie autour des pôles administratif et universitaire localisés aux actuelles Places de la République et de l'Université. La construction doit ensuite être un tout organique et fonctionnel, une *Musteruniversität* moderne (25,26). Ainsi naît l'ensemble de bâtiments et de jardins que nous connaissons encore, avec le Palais universitaire (Kollegien-Gebäude), lieu d'administration et de représentation, accueillant les « sciences de l'esprit » et les mathématiques, les pavillons distincts dédiés aux « sciences de la nature » et l'Observatoire dans les jardins botaniques. La construction commence avec l'Observatoire (1877-1881) – doté du télescope le plus puissant en Allemagne – et l'Institut de physique (1878-1881) ; suivent ensuite l'Institut de botanique (1880-1882) et, plus tard, les Instituts de minéralogie (1887-1890) et de zoologie (1890-1893) ; le Palais universitaire, commencé en 1879, est inauguré en 1884.



En 1883, la construction du Palais universitaire s'achève. La tour de l'Institut de physique se profile déjà à droite derrière le bâtiment. Les Instituts de minéralogie et de zoologie ne sont pas encore commencés.

Le mise en place du personnel se traduit, dès 1872, par un contingent d'une cinquantaine de postes de professeur en titre (*Ordinarius*), ce qui dépasse celui de la plupart des autres universités. Attirée par des avantages matériels particuliers ainsi que par l'ambition du projet scientifique, cette première génération universitaire comprend surtout des personnalités jeunes et brillantes, issues des meilleurs centres de recherche et d'enseignement allemands ; dans le choix, les critères de recherche sont primordiaux. La proportion d'universitaires alsaciens-lorrains de souche restera minime et limitée aux fonctions subalternes de professeur associé (*Extraordinarius*) et de maître de conférence (*Privatdozent*).

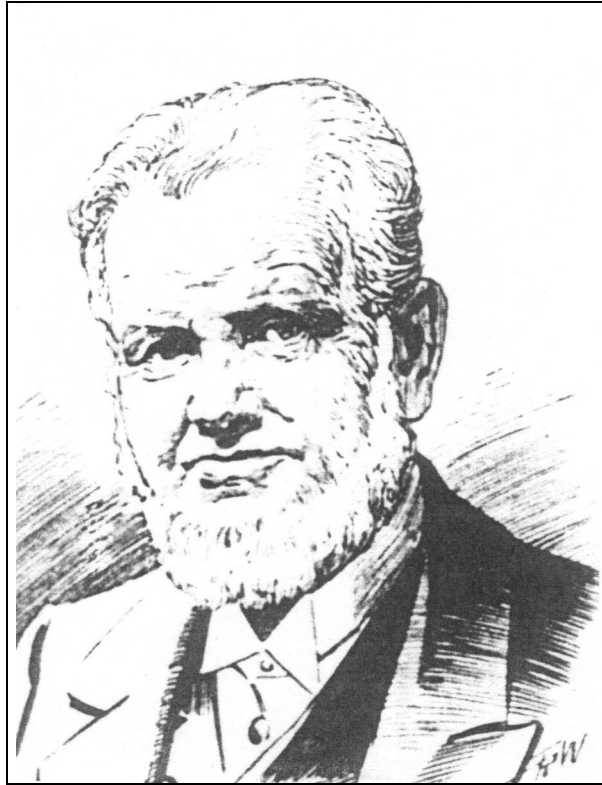
Pour l'enseignement, le projet initial envisage une « université de taille moyenne », accueillant de 1000 à 1200 étudiants. Mais ce nombre ne sera atteint qu'au tournant du siècle quand des étudiants alsaciens autochtones finiront par compléter les effectifs d'abord composés, pour l'essentiel, par les vieux-allemands locaux et par des étrangers des autres États allemands ou non. Pendant toute sa durée,

l'Université de Strasbourg aura un taux d'encadrement très favorable, comparé aux autres universités allemandes.

Selon les promoteurs du « modèle strasbourgeois », l'Université doit expérimenter une approche de la recherche adaptée à l'époque moderne, où le traditionnel esprit de von HUMBOLDT s'allie aux exigences nouvelles du professionnalisme industriel. Il s'agit donc de distinguer les domaines spécialisés, d'adapter les édifices et locaux aux fonctions, équiper les laboratoires de manière rationnelle avec l'instrumentation la plus performante, créer des bibliothèques d'institut et aménager les espaces d'étude et de séminaires. La réalisation pratique de ce programme suit les directives des directeurs d'Institut, professeurs recrutés pour leur renom dans les disciplines envisagées : WINNECKE (astronomie), KUNDT (physique), FITTIG (chimie), de BARY (botanique) ... Après sa construction, en régime de fonctionnement normal, l'Université de Strasbourg se place directement après les grandes Universités de Berlin et de Leipzig pour la dotation budgétaire. Elle imposera rapidement sa réputation d'*Arbeitsuniversität* dynamique et jeune, de grande renommée scientifique. Entre 1872 et 1918, plus de 3500 thèses sont soutenues. Le corps enseignant est jeune : jusqu'en 1884, 52 habilitations sont accordées ; avant 1897, 88 enseignants formés à Strasbourg sont engagés par d'autres universités dont les plus importantes à Berlin et Leipzig ; au début du 20<sup>e</sup> siècle, il y avait peu d'universités allemandes sans un ou plusieurs anciens maîtres de conférence strasbourgeois parmi leurs enseignants (26).

### ***De Strasbourg à Berlin : F. Althoff, artisan du renouveau universitaire allemand***

La signification particulière de la création de l'Université impériale à Strasbourg dans le développement général du système d'enseignement et de recherche allemand s'illustre dans l'action déterminante du haut-fonctionnaire et professeur prussien Friedrich ALTHOFF (1838-1908), d'abord à Strasbourg, puis à Berlin (27). Entre 1872 et 1882, il est la personnalité la plus influente du comité de pilotage du « modèle strasbourgeois », dont il inspire la conception et contrôle la réalisation en suivant de près la mise en place des infrastructures et le choix des enseignants et directeurs d'institut. En 1882, il est nommé à la direction du Département des universités du ministère des Cultes (Instruction publique) de Prusse, où son expérience strasbourgeoise lui sera utile pour moderniser le système universitaire de l'État prussien. Jusqu'à sa retraite en 1907, il exerce ainsi un magistère vigilant sur l'enseignement et la recherche de son pays. Son objectif déclaré est « la gestion du progrès pour développer l'entreprise Science avec une véritable politique scientifique » ; celle-ci ne peut se limiter aux aspects intérieurs et doit aussi assurer le prestige de la culture et de la science allemande à l'extérieur.



Friedrich ALTHOFF (1839-1908)

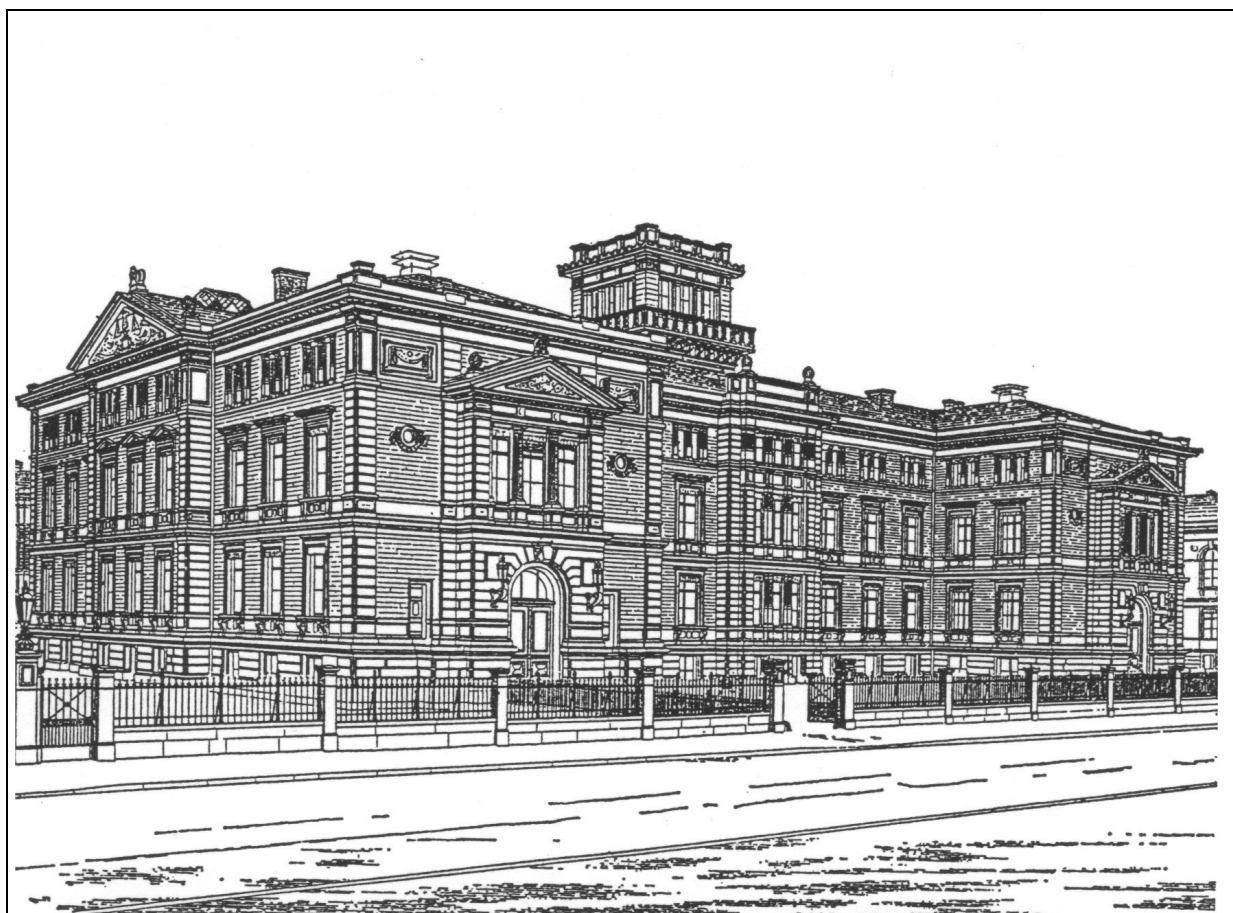
Professeur à l'Université de Strasbourg entre 1872 et 1882, il dirige de 1882 à 1907 l'organisation scientifique et le système universitaire de l'Allemagne prussienne en s'inspirant du « modèle strasbourgeois ».

S'inspirant du modèle strasbourgeois, ALTHOFF incite les universités à installer des instituts et séminaires spécialisés avec les laboratoires, bibliothèques et salles de travail appropriés. Entouré d'un cercle de conseillers scientifiques de compétence incontestée tels F. KLEIN et H. von HELMHOLTZ, il veille à la qualité du recrutement des professeurs : intervenant éventuellement dans les classements proposés par les universités, il régule la traditionnelle mobilité des enseignants de l'Université humboldtienne et influe sur le choix des candidats aux endroits qui lui semblent sensibles ; de nombreuses personnalités, qui marqueront la physique moderne, telles D. HILBERT, R.L. MINKOWSKI, H.R. HERTZ, M. PLANCK ... ont bénéficié de son soutien à des moments critiques de leur jeune carrière. Pour optimiser l'effort financier de l'État, il crée des centres d'excellence en y associant si possible l'industrie ; ainsi, pour les mathématiques pures et appliquées aux sciences de la nature, se développe l'Institut de Göttingen sous la houlette de Félix KLEIN avec le soutien de KRUPP et de l'industrie des colorants ; à Berlin, la grande tradition de physique expérimentale de MAGNUS est couronnée par la fondation de *Physikalisch-Technische Reichsanstalt* sous l'impulsion de l'industriel W. von SIEMENS et sous la direction de HELMHOLTZ (1887) ; plus tard, la direction de ce prestigieux institut de métrologie sera assurée successivement par les physiciens strasbourgeois F. KOHLRAUSCH (1895) et E. WARBURG (1905).

Le volet complémentaire d'action vers l'extérieur de l'administration sous ALTHOFF est essentiellement destiné à la promotion, à l'étranger, des réalisations allemandes dans l'enseignement, la recherche scientifique et l'industrie. Pour cela, un ensemble d'opérations bilatérales est systématiquement poursuivi, avec, si possible, des sources de financement privées de part et d'autre : création de centres d'information, organisation de programmes d'échange de professeurs, d'accueil de chercheurs et d'étudiants ... ALTHOFF accorde une attention spéciale aux Etats-Unis, alors en rapide montée en puissance, avec lesquels il établira des liens solides et durables. Pour les pays moins développés, il facilitera la formation des étudiants dans les centres réputés en Allemagne ; ainsi

l'Institut de physique de Strasbourg accueille P.N. LEBEDEV auprès de KUNDT, entre 1887 et 1891, puis L.I. MANDELSHTAM auprès de BRAUN, entre 1899 et 1914, avant leur retour en Russie où ils fondent à leur tour les importantes écoles de physique que l'on sait ; de même, l'autre pionnier de la physique russe, A.F.F. IOFFE apprend son métier à Munich auprès de l'ancien strasbourgeois RÖNTGEN.

L'impact du « système ALTHOFF » au début du 20<sup>e</sup> siècle est par ailleurs attesté par les 18 prix Nobel attribués pour les Sciences de la nature à des universitaires allemands avant 1918. Parmi les lauréats, les physiciens W. RÖNTGEN (1901) et F. BRAUN (1909), les chimistes E. FISCHER (1902) et A. von BAEYER (1905) sont passés par l'Université de Strasbourg, de même que A. KOSSEL (1910) en médecine.



L'Institut de physique fonctionne depuis octobre 1882.

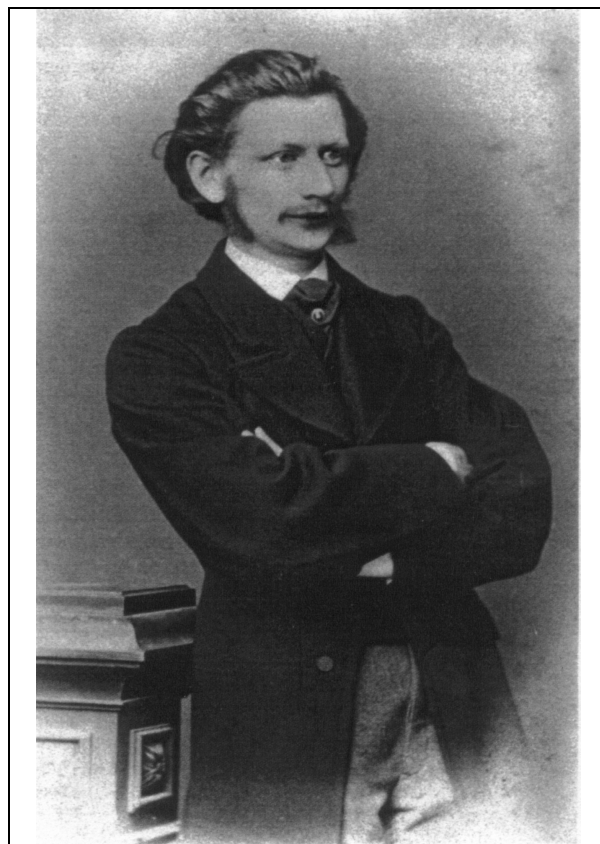
### ***L'Institut de physique de Strasbourg***

Quand August KUNDT (1838-1894) est appelé pour créer l'Institut de physique strasbourgeois, il est l'héritier direct et reconnu de l'École de physique fondée par G.H. MAGNUS à l'Université de Berlin (1843). C'est à cette École que l'on attribue généralement l'origine de l'exercice moderne de la discipline par la pratique du travail expérimental dans des laboratoires rationnellement équipés et de la discussion critique des projets et résultats dans le « *Kolloquium* » réunissant enseignants, étudiants et visiteurs étrangers. Les physiciens autour de MAGNUS créent aussi la *Physikalische Gesellschaft zu Berlin* (1843) et éditent les *Annalen der Physik*. HELMHOLTZ, SIEMENS, KIRCHHOFF, CLAUDIUS, de même que les étrangers TYNDALL, GIBBS, sont parmi les premiers étudiants à l'École. A. KUNDT y étudie de 1863 à 1868 : après sa thèse (1864), il est l'assistant de MAGNUS,

chargé du fonctionnement du laboratoire et du *Kolloquium* ; son premier élève est E. WARBURG qu'il retrouvera à Strasbourg ; en 1868, quittant Berlin pour succéder à CLAUSIUS comme professeur au Polytechnicum de Zürich, il a déjà le renom d'un expérimentateur hors pair, notamment par les études sur la vitesse du son dans les gaz avec sa technique des « tubes de Kundt ». C'est encore à CLAUSIUS qu'il succèdera à Würzburg, où il restera de 1869 jusqu'à sa nomination à Strasbourg (14,21,28).

Lieu d'enseignement et de recherche adapté à l'exercice de la physique selon l'esprit de MAGNUS, le nouvel Institut à Strasbourg comprend naturellement l'ensemble suffisamment spacieux d'amphithéâtres, de salles de colloques et de travail, d'une bibliothèque, de laboratoires et d'ateliers. Selon KUNDT, le pain quotidien du physicien est la pratique expérimentale imaginative et précise « vers et à partir de la connaissance théorique », où il s'agit d'inventer l'instrumentation destinée à mettre en évidence (les ...scopes) et à mesurer (les ...mètres) de nouveaux phénomènes ; il est donc important qu'une solide infrastructure technique, avec des ateliers et du personnel qualifié, soit mise en place. Toute l'organisation est supervisée de près par le directeur qui, avec sa famille, dispose d'un logement de fonction dans l'Institut, de même que deux de ses assistants et deux de ses agents de service.

Afin de contribuer à son meilleur fonctionnement, l'Institut de physique doit aussi se préserver des perturbations extérieures de toute nature – électrique, magnétique, optique, vibrations mécaniques ... Pour cela, à la suite d'importantes modifications du plan initial d'implantation du complexe universitaire, imposées par Berlin en 1878, le bâtiment est finalement construit nettement en retrait de la Rue de l'Université et isolé des autres édifices ; les Instituts de minéralogie et de zoologie doivent ainsi céder leur place pour être transférés de l'autre côté de la Rue de l'Université, hors de l'enclos primitivement projeté.



August KUNDT (1838-1894) à Würzburg, quand il accepte la direction de l'Institut de physique de Strasbourg.

L'Institut de physique dans sa version définitive fonctionne en octobre 1882. Sa construction a fait partie de la première tranche de travaux, conformément à une promesse faite à KUNDT qui voulait quitter au plus vite les locaux inadaptés de l'Hôtel de l'Académie. Dès lors il jouit de sa réputation d'institut-modèle offrant d'exceptionnelles conditions de travail surtout pour les expérimentateurs. Dans l'ascension professionnelle des meilleurs physiciens, la *Kaiser-Wilhelm-Universität* occupe une place hiérarchique privilégiée parmi les universités allemandes, à l'exception des prestigieuses institutions de Berlin. Les directeurs successifs sont A. KUNDT, F. KOHLRAUSCH et F. BRAUN : KUNDT ne quittera Strasbourg que pour prendre la succession de HELMHOLTZ à la direction de l'Institut de physique de l'Université de Berlin (1888) ; son successeur KOHLRAUSCH, à son tour, sera promu à la direction de la *Physikalisch-Technische Reichsanstalt*, vacante après le décès du même HELMHOLTZ (1894). BRAUN est également sollicité par l'Université de Berlin en 1905, mais choisit de rester à Strasbourg, dont il préfère la qualité de vie : à la différence de ses prédécesseurs – prussiens en pays de mission – il se sent bien intégré à la société strasbourgeoise et alsacienne (29).

### ***Les années Kundt : 1872-1888***

Dans une lettre à ALTHOFF, son conseiller physicien HELMHOLTZ commente les tâches et qualifications souhaitables d'un professeur d'université (21, chap.15) ; il souligne que, en plus des cours de physique expérimentale suivis par les futurs médecins, pharmaciens et fonctionnaires, il faut offrir un enseignement de « physique mathématique pour une présentation complète et rigoureuse des lois de la nature, qui nécessite une formulation mathématique et qui, après tout, est indispensable pour les futurs enseignants et mathématiciens ». Le physicien complet est donc « un expérimentateur expérimenté ayant une connaissance étendue de la présentation mathématique des théories physiques ».

Mais il peut aussi être avantageux de constituer un tandem où le professeur en titre (*Ordinarius*) délègue le versant des activités où il se juge moins compétent à un collègue plus jeune, nommé professeur associé (*Extraordinarius*) à cet effet. Telle est l'une des innovations dans le modèle strasbourgeois de ALTHOFF, qui se répandra dans l'ensemble des universités allemandes (21). Elle est taillée à la mesure de A. KUNDT, considéré comme l'expérimentateur le plus doué de son époque, mais qui « *ganz gemeiner Experimentalphysiker* » ne pense pouvoir monter une expérience significative sans la réflexion théorique avec des collaborateurs compétents (30). L'Institut de physique strasbourgeois est ainsi pourvu d'un poste de professeur associé à vocation théorique qui sera occupé par E. WARBURG de 1872 à 1876, par W.C. RÖNTGEN de 1876 à 1879, par F. BRAUN de 1880 à 1883 et par E. COHN à partir de 1884. Pour l'enseignement, KUNDT garde le cours de Physique expérimentale et la responsabilité des Travaux pratiques, mais délègue les autres, de nature théorique, au professeur associé ou à un maître de conférence (*Dozent*). Quant à la recherche, il collabore étroitement avec ses anciens élèves WARBURG et RÖNTGEN, mais moins avec BRAUN et COHN qui poursuivent leurs propres projets. Plus que mesurer avec précision des phénomènes déjà mis en évidence, KUNDT veut avant tout découvrir des phénomènes nouveaux suggérés par les grandes théories classiques qui, au début des années 1870, sont encore en pleine gestation : la théorie cinétique des gaz et la physique statistique de CLAUSIUS, MAXWELL et BOLTZMANN, la théorie électromagnétique de la lumière de FARADAY et MAXWELL.

Dès les débuts de l'Institut de physique à Strasbourg, KUNDT affirme, à côté du domaine de recherches acoustiques familier depuis ses premiers travaux berlinois, son intérêt et son expertise dans le domaine optique. C'est en 1872 qu'il publie ses découvertes de la diffusion anormale de la lumière dans diverses solutions de colorants organiques (31). À cette époque, ce phénomène est encore généralement envisagé dans le modèle de l'éther élastique de FRESNEL-CAUCHY qui prévoit normalement une variation monotone, avec  $dn/d\lambda < 0$ , de l'indice de réfraction  $n$  du milieu avec la

longueur d'onde  $\lambda$  de la lumière. Or KUNDT met en évidence un comportement anormal, avec  $dn/d\lambda > 0$ , dans les régions spectrales où l'absorption est intense ; pour maîtriser la difficulté pratique d'observation de l'effet à cause de l'extinction du spectre par absorption, il met au point sa « méthode spectroscopique des prismes croisés ». Ensuite, il étend ces études aux métaux, ayant réussi à préparer des prismes métalliques suffisamment minces pour être traversés par la lumière. Toutes ces observations conduisent rapidement à interpréter les variations spectrales de l'indice de réfraction et du coefficient d'absorption des milieux matériels au moyen de particules oscillantes en interaction résonnante avec la lumière, selon un mécanisme de nature d'abord mécanique (SELLMEIER, 1872), mais qui ouvrira la voie aux modèles classiques ultérieurs, de nature électrique, suggérés par HELMHOLTZ (1875), puis élaborés par DRUDE (1900) et par LORENTZ dans sa théorie électronique de la matière (1904).



Emil WARBURG (1846-1934)  
Élève et collaborateur de KUNDT de Strasbourg.

Avec Emil WARBURG (1846-1931), son premier professeur associé, la collaboration est déjà ancienne : elle débute en 1865 quand l'étudiant WARBURG est pris en charge à Berlin par le jeune assistant KUNDT au laboratoire de MAGNUS. KUNDT met alors au point sa classique méthode de visualisation des ondes stationnaires et de mesure de la vitesse du son de gaz dans des tubes (28). Selon l'expression de LAPLACE pour la vitesse sonore, une telle mesure est aussi une méthode efficace d'évaluation du rapport  $\gamma = c_p/c_v$  des chaleurs spécifiques à pression et à volume constants. Or, dans les années 1870, le rapport  $\gamma$  est l'une des quantités les plus discutées par les pionniers de la théorie cinétique des gaz, dans leur effort de préciser la nature des lois d'équipartition de l'énergie thermique entre les degrés de liberté des molécules. C'est une expérience de KUNDT et WARBURG qui, en 1876, fournit un support direct et décisif à cette théorie encore incertaine et controversée : ils réussissent à mesurer, pour la première fois, le rapport dans un gaz monoatomique, la vapeur de mercure ; la valeur  $\gamma = 1,667$ , trouvée pour ce système-modèle où seules les translations interviennent, est nettement plus forte que celles des gaz moléculaires déjà connues, mais confirme précisément la prévision de la théorie cinétique. Dès 1857, CLAUSIUS avait établi que  $\gamma = 1 + (E_{tr}/E)$  où  $E$  et  $E_{tr}$  désignent les énergies moyennes totale et de translation ; les valeurs empiriques  $\gamma = 1,4$  alors connues indiquaient que  $E_{tr}/E = 0,6$ , ce qui impliquait, selon CLAUSIUS, une contribution d'« énergie interne

» avec des degrés de liberté de nature longtemps controversée. En 1876, après la publication du travail des physiciens strasbourgeois, BOLTZMANN propose de prendre  $E_{tr}/E=3f$  avec respectivement  $f=3, 5$  et  $6$  pour les gaz mono-, di- et polyatomiques et rend ainsi compte avec précision de l'ensemble disponible des données expérimentales. Paradoxalement un tel choix exclut les degrés de liberté internes de vibration des molécules, ce qui semble inacceptable, en particulier pour MAXWELL ; on sait que ce « paradoxe de BOLTZMANN » ne pourra être clarifié que bien plus tard, dans le cadre de la théorie quantique.

À la même époque, KUNDT et WARBURG s'intéressent aussi à un autre résultat surprenant et spectaculaire de la théorie cinétique de CLAUSIUS et de MAXWELL, selon lequel la conductance thermique et la viscosité des gaz sont indépendantes de la pression. Par des approches expérimentales diversifiées, ils confirment avec précision qu'il en est bien ainsi, mais à condition que la pression soit suffisamment forte pour que le libre parcours moyen des molécules soit petit comparé à la distance moyenne entre celles-ci et aux dimensions du récipient. Ils parviennent à étendre leur étude aux très faibles pressions ( $<1\text{mmHg}$ ) et, dans l'interprétation des résultats, complètent la description cinétique en caractérisant l'influence des parois par un mouvement de glissement des molécules et un saut de température mesurables (1875).

Près d'un demi-siècle plus tard, dans une évocation des travaux de WARBURG avec KUNDT à Strasbourg, EINSTEIN souligne l'importance cruciale de leur mise en évidence expérimentale des nouveaux phénomènes prédits par la théorie moléculaire de la chaleur, et note : « Si les énergétistes à la fin du 19<sup>e</sup> siècle avaient suffisamment apprécié ces arguments, il leur aurait été difficile de nier la validité de la théorie moléculaire » (32).

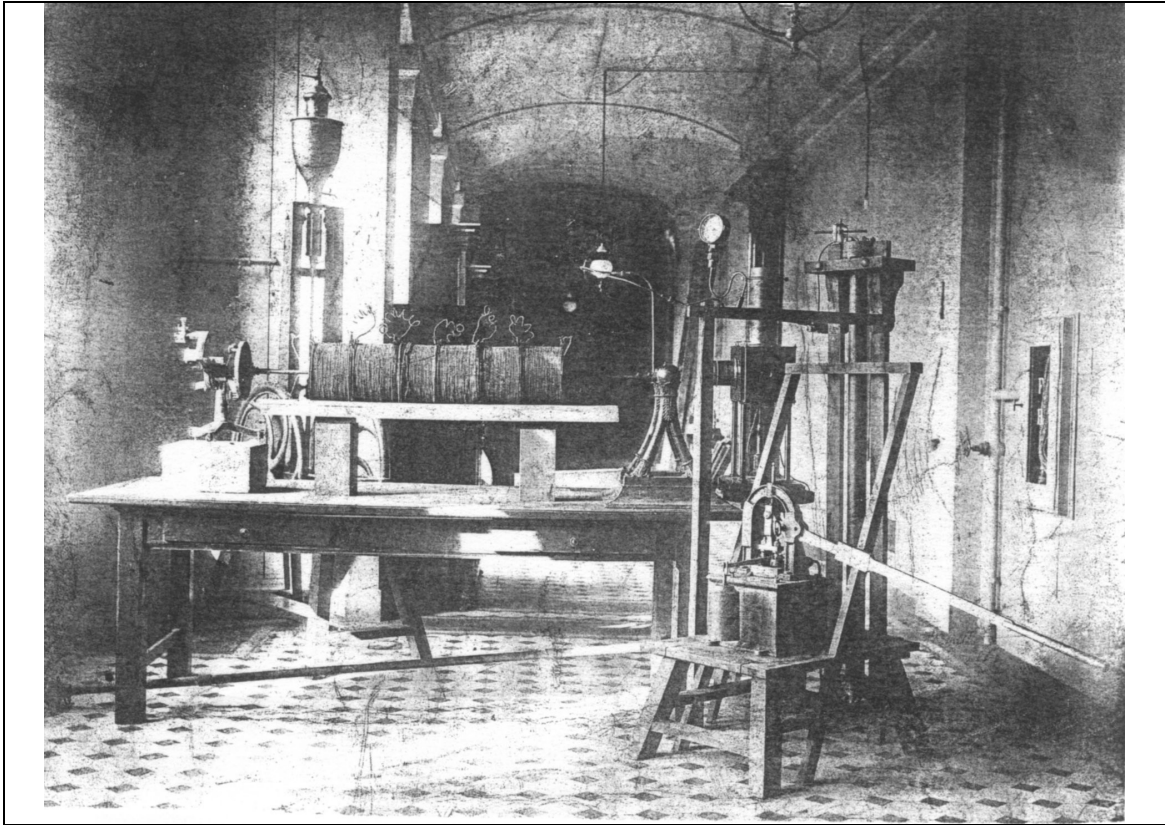
Promu professeur titulaire à l'Université de Fribourg, WARBURG quitte Strasbourg en 1876. C'est à Fribourg en 1881 qu'il découvrira le phénomène d'hystérésis des corps ferromagnétiques (14, 32). En 1895, il sera appelé à succéder à KUNDT, qui vient de décéder, comme directeur de l'Institut de physique à Berlin, où il poursuivra la suite de sa fructueuse carrière de physicien « complet » selon la définition de HELMHOLTZ.

Wilhelm Conrad RÖNTGEN (1845-1923) qui occupe le poste de professeur associé à l'Institut de physique après le départ de WARBURG est un autre élève et ami de KUNDT, qui l'accompagne depuis leur rencontre au Polytechnicum de Zürich en 1869 (33). Ingénieur diplômé de cette institution en 1868, RÖNTGEN y a bénéficié d'une solide formation théorique par des enseignants comme le physicien CLAUSIUS, ainsi que les mathématiciens CHRISTOFFEL et REYE qu'il retrouvera à Strasbourg. Un an après, il soutient une thèse de nature théorique sur les propriétés thermodynamiques des gaz, puis est recruté comme assistant par le jeune professeur KUNDT qui vient d'être nommé à Zürich. C'est au Polytechnicum qu'il commence ses premières recherches expérimentales portant déjà sur le thème développé plus tard par KUNDT et WARBURG : la détermination du rapport  $\gamma$  des chaleurs spécifiques de gaz à pression et volume constants ; dans son approche, il améliore l'ancienne et délicate méthode de CLEMENT ET DESORMES (34) fondée sur des mesures d'élévation de température lors d'une compression, puis de diminution de pression lors du refroidissement du gaz enfermé dans un ballon ; il corrige ainsi des résultats antérieurs de l'illustre expérimentateur F. KOHLRAUSCH, qui étaient faussés par des erreurs systématiques. RÖNTGEN termine l'essentiel de ce travail à Würzburg, puis à Strasbourg, où il suit KUNDT, toujours comme assistant à la *Kaiser-Wilhelm-Universität*, les obstacles administratifs bloquant sa carrière sont levés et il sera rapidement habilité comme *Privatdozent* avant d'être nommé professeur associé en 1876.



Wilhelm Conrad RÖNTGEN 1845-1923  
Elève et collaborateur de KUNDT de Strasbourg.

À l'Institut de physique de Strasbourg, RÖNTGEN entreprend aussi une étude de la conduction thermique dans les cristaux étendant ainsi son champ de recherche à la physique des solides qui restera son domaine préféré par la suite. Mais il s'investit surtout dans l'autre programme de prédilection de KUNDT, celui des phénomènes optiques avec les nouveaux problèmes posés par les récentes idées sur le champ électromagnétique de FARADAY, énoncées par MAXWELL (1861-1862) : « light consists in the transverse undulations of the same medium which is the cause of electric and magnetic phenomena ». Ensemble, ils reprennent l'expérience emblématique de FARADAY qui avait trouvé une relation entre lumière et champ magnétique en observant la rotation du plan de polarisation lumineuse par un champ dans un verre de plomb. Pour établir l'universalité de l'effet, il fallait cependant le mettre en évidence dans d'autres milieux, gazeux en particulier, ce que FARADAY n'a pu réussir : dans quatre publications (1879-1880), RÖNTGEN et KUNDT montrent que l'effet Faraday a bien lieu dans les gaz, bien qu'avec un pouvoir rotatoire relativement faible, qu'ils ont étudié (28,35) ; plus tard, en 1884, KUNDT met en évidence et étudie l'effet dans un autre cas extrême, avec des films transparents de fer, où le pouvoir rotatoire est par contre énorme.



Le dispositif expérimental de Kundt et Röntgen pour mettre en évidence l'effet Faraday dans les gaz (1879). À droite, le dispositif de pompage. Au centre, la bobine magnétique avec la source de lumière à droite et le polarimètre à gauche. Le tube avec l'échantillon du gaz sous pression est à l'intérieur de l'électroaimant.

Le retentissement de ces travaux contribue largement au choix de RÖNTGEN comme professeur en titre à l'Université de Giessen en 1879. Il y fera une autre découverte majeure en électromagnétisme avec la mise en évidence directe des courants de déplacement de MAXWELL – appelés « courants de RÖNTGEN » par LORENTZ – dans un diélectrique, par l'apparition de phénomènes magnétiques dans celui-ci quand il est déplacé entre les plateaux d'un condensateur chargé (1888). Sa découverte des rayons X aura lieu en 1895 à Würzburg où, depuis 1889, il a pris la direction de l'Institut de physique (14,33).

Les cas de WARBURG et de RÖNTGEN illustrent par ailleurs l'extraordinaire impact de KUNDT comme enseignant : « le professeur le plus charismatique et influent de la physique allemande de l'époque » (P. Forman). Dans le groupe des tout premiers élèves présents à Zürich, Würzburg, puis Strasbourg, il faut aussi inclure Franz EXNER (1849-1926), assistant de KUNDT lors des débuts strasbourgeois. EXNER exercera une influence déterminante au tournant du siècle à Vienne, où il réorganise l'Institut de physique du temps de BOLTZMANN (21) ; parmi ses élèves figurent HASENÖHRL, SMOLUCHOWSKI et SCHRÖDINGER qui sera son assistant. Spectroscopiste atomique, spécialiste des terres rares, il participe aussi aux premières recherches sur la radioactivité et crée l'Institut de recherche sur le radium de Vienne, où il guide les premiers pas de Lise MEITNER. Il est également l'éditeur d'un très influent *Repertorium der Physik* pendant les dernières décades du 19<sup>e</sup> siècle.

Mais les élèves de KUNDT qui, avec RÖNTGEN, ont le plus marqué l'histoire de la physique sont les grands spectroscopistes KAYSER, PASCHEN et RUBENS, pionniers de l'exploration expérimentale des spectres des atomes et du corps noir, dont les travaux ont largement contribué à ouvrir l'ère quantique (36). Heinrich KAYSER (1853-1940) fait partie des premiers étudiants de

l'Institut de physique de Strasbourg, entre 1873 et 1879, puis est recruté comme assistant par HELMHOLTZ à Berlin, où il soutient la thèse qu'il a préparée sous la direction de KUNDT. D'abord à Hanovre avec RUNGE (1855) puis à Bonn, où il succède à HERTZ (1894), KAYSER entreprend une étude systématique des séries de raies spectrales dans le visible des atomes, en suivant les colonnes du tableau périodique. À partir de 1900, il rédige le monumental *Handbuch der Spektroskopie* (8 volumes), où les spectres des atomes sont désormais caractérisés par un ensemble de termes exprimés en  $\text{cm}^{-1}$ , dont les différences donnent les nombres d'ondes des raies observées ; rappelons que la dénomination officielle de l'unité  $\text{cm}^{-1}$  du nombre d'ondes est aussi « kayser ».

Friedrich PASCHEN (1865-1947) fait ses études à Strasbourg pendant les dernières années de la présence de KUNDT, de 1884 à 1888, où il soutient une thèse sur la décharge électrique dans les gaz. Assistant puis maître de conférence auprès de KAYSER et RUNGE à Hanovre, PASCHEN y participe aux recherches sur les séries spectrales atomiques et traite le cas de l'hélium avec les deux systèmes spectraux de l'ortho- et du parahélium (1895) ; à la même époque, il intervient aussi dans le débat qui s'amplifie sur le spectre du corps noir, par ses probantes vérifications expérimentales des lois de STEFAN-BOLTZMANN (1897) et de WIEN (1899). Nommé professeur titulaire à Tübingen en 1901, il continue son impressionnante série de contributions dorénavant mentionnées dans tous les cours de physique atomique et quantique : la découverte de la « série de Paschen » dans l'infra-rouge du spectre de l'hydrogène (1908), la découverte de l'effet Zeeman anormal des atomes alcalins (1912) et de l'« effet Paschen-Back » qui se manifeste aux champs magnétiques élevés (1913), la première mesure de la structure fine dans le spectre  $H_\alpha$  de l'hydrogène en accord avec le récent calcul de SOMMERFELD (1916) ... ; on connaît l'influence déterminante de ces résultats sur le développement de la théorie quantique, plus d'une dizaine d'années plus tard (36).

Heinrich RUBENS (1868-1922) est, lui aussi, un étudiant de la dernière génération formée par KUNDT à Strasbourg ; il y commence ses études en 1886, puis suit son directeur à Berlin où il soutient une thèse sur la réflexion de la lumière de grande longueur d'onde par les métaux (1889). Ce travail s'inscrit dans le programme de recherche lancé à Strasbourg par KUNDT sur les propriétés optiques des métaux, mais oriente définitivement RUBENS vers la spectroscopie dans l'infra-rouge, dont il deviendra le grand spécialiste. En tant que tel, il fait partie de l'encadrement de la *Physikalisch-Technische Reichsanstalt* dès 1896, avec le titre de professeur à partir de 1900. Dans la progression de sa maîtrise de la spectroscopie optique dans l'infra-rouge de plus en plus lointain, il découvre le phénomène des *Reststrahlen* (1896), vérifie et précise les idées de DRUDE sur la relation des propriétés optiques et de la conductivité des métaux (1902) et caractérise des ondes lumineuses millimétriques (1910), se rapprochant ainsi du domaine spectral des ondes hertziennes, étudiées par les techniques électriques héritées de HERTZ. Mais RUBENS est surtout connu pour son intervention décisive en 1900 dans le débat sur la distribution spectrale du corps noir : en comparant ses données spectrales particulièrement complètes et précises, obtenues avec KURLBAUM, aux relations théoriques de WIEN et de RAYLEIGH-JEANS, il met en évidence des désaccords significatifs aux grandes et petites longueurs d'onde respectivement ; l'accord est par contre excellent dans tout le domaine spectral avec la loi que vient d'élaborer PLANCK laquelle, grâce à cette solide validation expérimentale, pourra servir de point de départ aux développements quantiques (14,36).

À la fin des années 80, les thèmes de recherche strasbourgeois sont nécessairement marqués par la secousse épistémologique provoquée par les travaux de H. HERTZ de Karlsruhe entre 1886 et 1888. En présentant ses résultats de mise en évidence et de caractérisation d'« ondes électriques » d'une trentaine de  $\text{cm}$  de longueur d'onde, HERTZ souligne leur accord avec la théorie encore controversée du champ électromagnétique de MAXWELL et sa vision unitaire des ondes électriques et lumineuses. Rapprocher et démontrer de nouvelles analogies dans les domaines traditionnellement séparés des phénomènes électriques et optiques devient alors un enjeu séduisant, relevé en particulier à l'Institut de physique par les jeunes chercheurs WIENER et LEBEDEV.

Otto WIENER (1862-1927) soutient en 1887, sous la direction de KUNDT, sa thèse de doctorat sur « les changements de phase de la lumière lors de la réflexion et des méthodes de détection de films minces ». Ce travail le prépare idéalement à la performance expérimentale de réalisation de l'analogie optique des ondes stationnaires électriques de HERTZ, publié en 1890 : les nœuds et ventres produits par réflexion d'un faisceau lumineux monochromatique sur un miroir d'argent sont détectés sur une mince plaque photosensible inclinée par rapport au miroir ; les observations confirment la parfaite analogie avec les ondes hertziennes et montrent que c'est le vecteur champ électrique qui est photographiquement actif. Trois années plus tard, ces expériences inspireront G. LIPPMANN dans l'invention de son procédé de photographie en couleur. Habilité comme maître de conférence en 1890, WIENER reste à Strasbourg jusqu'en 1895. Nommé professeur titulaire successivement à Giessen (1895) et à Leipzig (1898), il aura dans chacune de ces universités la charge de la construction d'un nouvel institut de physique (14,21).



Pyotr Nikolaevich LEBEDEV (1866-1912)

Elève de KUNDT, fondateur de la « première école moderne de physique en Russie ».

Pyotr N. LEBEDEV (1866-1912), en 1887, vient de Moscou à Strasbourg pour continuer ses études de physique avec KUNDT. Mais, pour des raisons administratives, il ne peut suivre celui-ci à Berlin. Il reste donc à l'Institut de physique, désormais dirigé par KOHLRAUSCH, jusqu'en 1891, en s'intéressant, entre autres, aux phénomènes de polarisation diélectrique et leur interprétation par les théories de MOSSOTI et CLAUSIUS. C'est après son retour à l'Université de Moscou que LEBEDEV réalise la première extension significative de l'expérience de HERTZ vers les longueurs d'ondes plus courtes, dans le domaine millimétrique (1895). Ses fameuses études expérimentales, mettant en évidence la pression de la lumière sur la matière, ont lieu à partir de 1901. À Moscou, le rayonnement du professeur LEBEDEV se traduira au début du 20<sup>e</sup> siècle par l'épanouissement d'une prestigieuse École de physique où « selon l'enseignement de KUNDT, il faut penser en physicien » (14,37).

Wilhelm HALLWACHS (1859-1922) est un autre étudiant de KUNDT, auteur en 1888 d'une contribution majeure suscitée par des réflexions de HERTZ : la découverte de l'effet photoélectrique,

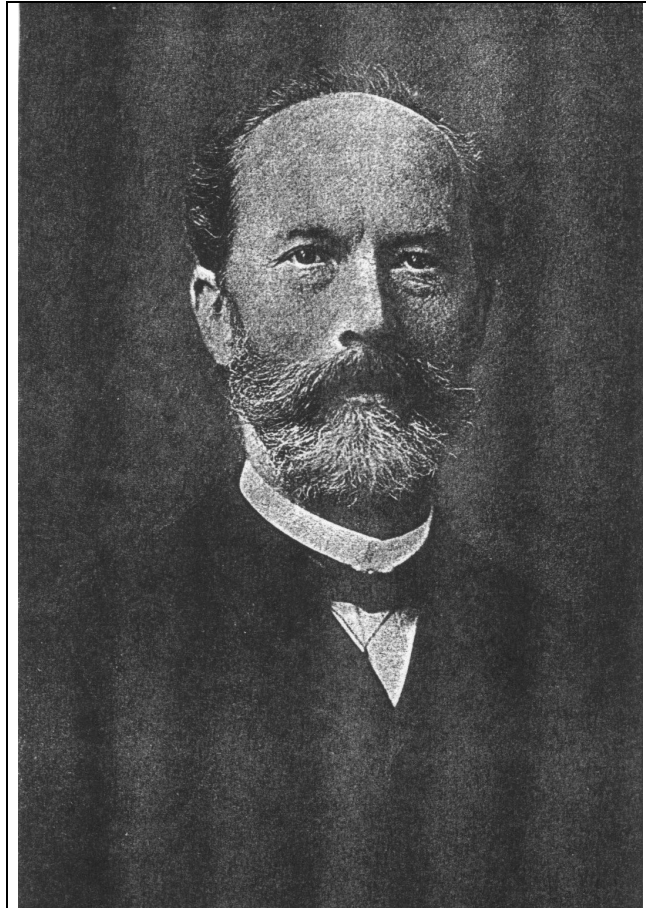
souvent qualifiée de « *Hallwachs-Effekt* » dans la littérature allemande de l'époque (36,38). Lors de ses expériences sur les ondes électromagnétiques, en 1887, HERTZ avait noté que les décharges électriques entre deux électrodes métalliques étaient facilitées en illuminant la cathode ; tout en notant l'intérêt potentiel de cette nouvelle « relation entre deux forces entièrement différentes », l'électricité et l'optique, il ne pouvait cependant s'en occuper immédiatement. Dans les mois qui suivent, HALLWACHS parvient à révéler explicitement l'effet en observant qu'un électroscope à plateau de zinc soigneusement poli, éclairé par une lampe à arc, se décharge rapidement si sa charge est négative, alors que la vitesse de déperdition des charges positives n'est pas modifiée ; il faut donc invoquer l'émission de charges négatives de la plaque métallique illuminée. HALLWACHS note aussi que l'effet n'est pas modifié en élevant la température du métal et que la lumière rouge ou infra-rouge n'a pas d'action. Ce n'est qu'une douzaine d'années plus tard que les expériences de LENARD montrent plus précisément que l'effet ne se produit qu'au-delà d'un seuil de la fréquence lumineuse et que l'énergie des rayons cathodiques émis ne dépend pas de l'intensité mais de la fréquence de la lumière (1905). Après le départ de KUNDT, HALLWACHS reste à Strasbourg comme maître de conférences ; il y collabore avec son beau-père et nouveau directeur KOHLRAUSCH sur des problèmes de conductivité dans les électrolytes, avant de reprendre son étude de l'effet photoélectrique dont il est un expert reconnu. Il terminera sa carrière comme professeur à Dresde, où il est nommé en 1893.

Émile COHN (1854-1944) est une dernière figure intéressante dans cette galerie de portraits d'étudiants de KUNDT à Strasbourg. Jusqu'à la fin de la période allemande en 1918, toute la carrière de ce physicien se déroule à Strasbourg. Après la soutenance de sa thèse portant sur les propriétés thermoélectriques de fils tendus (1878), il révèle un profil – relativement rare à cette époque – de théoricien, ce qui incite KUNDT à lui confier la succession de RÖNTGEN comme professeur associé, chargé des enseignements théoriques (1884). Après le départ de KUNDT, il gardera la même fonction d'enseignant et de chercheur théoricien auprès de KOHLRAUSCH puis de BRAUN, les nouveaux directeurs ; cette période de l'activité de COHN sera évoquée plus loin.

Quand, en 1888, KUNDT prend la direction de l'Institut de physique à Berlin, cette ville était devenue l'un des centres mondiaux de la physique. Il y demeure pendant les six ans qui lui restent à vivre avec le même rayonnement qu'à Strasbourg ; son collègue PLANCK en témoigne quand, dans son *Autobiographie scientifique*, il évoque ses liens avec « l'ardent directeur de l'Institut de physique, unanimement aimé pour la sincérité et la bonté toute humaine de ses sentiments ».

### ***Les années Kohlrausch : 1888-1895***

Friedrich KOHLRAUSCH (1840-1910), quand il succède à KUNDT, est également un personnage d'envergure de la physique allemande de la fin du 19<sup>e</sup> siècle. Les deux physiciens sont de la même génération et ont des parcours académiques qui se ressemblent. Chacun a appris son métier sous la direction d'un grand pionnier de la discipline – MAGNUS à Berlin pour KUNDT, WEBER à Göttingen pour KOHLRAUSCH – dans un centre d'excellence où d'importantes responsabilités leur étaient rapidement confiées. Nommés promptement professeurs titulaires, ils sont passés par Zürich, Würzburg et Strasbourg, ont construit de nouveaux Instituts de physique, avant d'exercer de prestigieuses fonctions scientifiques et administratives à Berlin. Les deux enseignants et chercheurs partagent aussi une exceptionnelle réputation dans l'exercice de l'expérimentation, mais selon des nuances qui les distinguent nettement : KUNDT est considéré comme le représentant emblématique de la « physique de l'expérience », explorateur de domaines inconnus, découvreur d'effets nouveaux ; KOHLRAUSCH est perçu par ses contemporains comme le maître incontesté de la « physique de la mesure », destinée à l'étude approfondie des domaines encore peu connus par une pratique diversifiée et rigoureuse de l'« art de la mesure » (21, chap.19).



Friedrich KOHLRAUSCH (1840-1895)

Le « physicien de la mesure », directeur de l'Institut de physique de Strasbourg de 1888 à 1895.

La carrière de Friedrich KOHLRAUSCH commence à l'Université de Göttingen sous la direction de Wilhelm WEBER. Celui-ci est un ami et ancien collaborateur du père de son élève, Rudolf KOHLRAUSCH, avec lequel il avait mesuré en 1856 le rapport des unités électrostatique et électromagnétique ( $3.11 \times 10^{10}$  cm/s) de la quantité de charge électrique, qui sera identifié en 1862 par MAXWELL comme la vitesse de la lumière (34). Après la soutenance de sa thèse en 1863, Friedrich reste auprès de WEBER comme assistant, puis comme professeur associé à partir de 1867. Il prend alors une part essentielle des charges d'enseignement et de fonctionnement du laboratoire, dont la solide infrastructure expérimentale est, par ailleurs, un cadre particulièrement favorable à son travail personnel de recherche (21, chap.17).

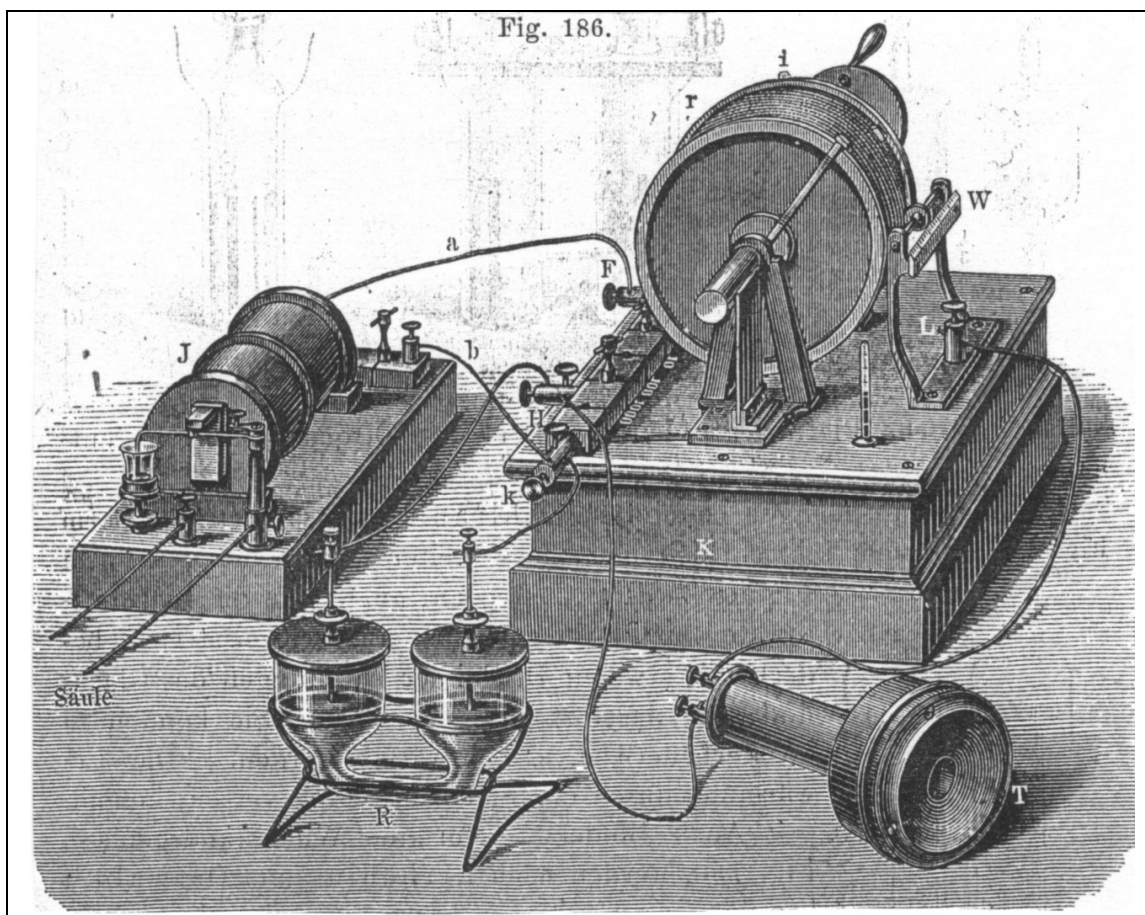
Pendant la deuxième moitié du 19<sup>e</sup> siècle, l'Institut dirigé par WEBER est un centre prestigieux de recherche et d'enseignement de la physique. Il poursuit la tradition initiée vers les années 1830 par C.F. GAUSS lors de ses recherches sur le magnétisme terrestre et leur extension, avec son jeune collègue WEBER, vers le nouveau domaine de l'électromagnétisme. Selon GAUSS (1835), « les brillantes découvertes d'OERSTED et de FARADAY ont ouvert un nouveau monde à la recherche scientifique, dont les jardins enchantés nous remplissent d'admiration ; nous ne pouvons soumettre ces riches domaines à notre domination que si nous sommes guidés par l'art de la mesure » ; son projet en physique est plus précisément « une investigation des lois mathématiques qui régissent la production et l'action de l'induction magnéto-électrique découverte par FARADAY et sa réduction à des mesures absolues » (21, chap.3). L'importance primordiale attribuée à l'« art de la mesure » et aux « mesures absolues » - rapportées exclusivement aux unités mécaniques – caractéristique de l'École de GAUSS et de WEBER, s'exprime pleinement dans les premiers travaux de

KOHLRAUSCH : bien dans la tradition du laboratoire, ils portent sur la conception et la réalisation de nouvelles techniques et d'instruments pour des mesures fines et absolues en magnétisme et en électricité, mais aussi en élasticité, thermométrie, réflectomètre optique ... Par la qualité, la quantité et la diversité de ses contributions, la réputation de « maître de la physique des mesures » de KOHLRAUSCH s'établit dès 1870, quand il publie sa fameuse initiation aux techniques du laboratoire, le *Leitfaden der praktischen Physik* ; l'ouvrage – qui est le premier du genre – connaîtra huit éditions et sera immédiatement traduit en plusieurs langues.

En 1870, KOHLRAUSCH quitte WEBER pour le Polytechnicum de Zürich, qui lui offre la chaire de professeur titulaire, occupée auparavant par CLAUSIUS et KUNDT. Après un an, il est rappelé en Allemagne, d'abord au Polytechnicum de Darmstadt (1871) puis à l'Université de Würzburg (1875), où il reste jusqu'à son départ pour Strasbourg (1888) ; il y supervise la construction de l'Institut de physique (1878), qui accueillera plus tard RÖNTGEN et la découverte des rayons X. C'est pendant toute cette période que KOHLRAUSCH développe ses contributions majeures à la connaissance physicochimique de la structure de la matière et de l'électricité : appliquant toute sa science de la mesure physique au domaine de l'électrolyse ouvert par FARADAY (1833), il parvient à élucider progressivement, en liaison avec le chimiste S. ARRHENIUS, les phénomènes de dissociation et de conduction ioniques dans les solutions d'électrolytes (39,40).

À Göttingen, l'électrolyse des solutions a toujours été un domaine familier d'expériences permettant, avant l'avènement des méthodes électromagnétiques, des mesures commodes et fiables de courant électrique. En 1886 encore, F. KOHLRAUSCH collaborera avec son frère Wilhelm, élève de KUNDT, pour déterminer avec précision l'« équivalent électrochimique » d'argent, i.e. 1,118mg/s d'Ag déposé dans une solution de sel d'argent parcourue par 1 ampère, qui servira de définition d'unité de charge électrique jusqu'en 1948.

Par ailleurs, à la fin de son séjour à Göttingen, KOHLRAUSCH est naturellement sensibilisé à la controverse qui oppose WEBER à HELMHOLTZ à propos de la nature de l'interaction électromagnétique : le premier défend la conception encore mécaniste de l'action à distance (1846), mais selon une loi qui, pour le dernier, est incompatible avec le principe de conservation d'énergie. De plus, la loi de Weber présuppose l'existence, dans la matière, de corpuscules positifs et négatifs avec des vitesses opposées mais nécessairement égales en valeur absolue. Ceci semble en contradiction flagrante avec des observations sur les phénomènes d'électrolyse en solution qui sont alors activement étudiés ; selon HITTORF (1863), le déplacement des anions et des cations vers leurs électrodes a en effet généralement lieu avec des vitesses différentes. Mais toute conclusion définitive est cependant encore interdite par l'état précaire des recherches sur les électrolytes en solution : on sait peu sur la nature, la formation et la mobilité des ions dans la solution ; la validité de la loi d'Ohm est incertaine ; au voisinage des électrodes les effets d'accumulation des produits et de polarisation des électrodes qui en résultent sont mal compris et maîtrisés.



Le pont de KOHLRAUSCH

L'appareil utilisé pour mesurer la résistance  $R$  d'une solution d'électrolyte comprend le dispositif  $J$  d'alimentation en courant alternatif, le téléphone  $T$  de détection d'équilibre du pont ; celui-ci est complété par des résistances constantes dans le socle  $K$  qui soutient le rhéostat  $W$  dont les résistances variables permettent l'équilibrage du pont.

À partir de 1868, KOHLRAUSCH entreprend l'étude systématique de ces problèmes en mettant au point son désormais classique « pont de Kohlrausch ». Il adapte, pour cela, la méthode de mesure des résistances par le pont de Wheatstone en utilisant du courant alternatif ( $\sim 100\text{Hz}$ ) au lieu de courant direct ; il peut ainsi déterminer la résistance de l'électrolyte en réduisant au maximum les effets parasites de polarisation aux électrodes de l'échantillon et en remplaçant comme détecteur de zéro le galvanomètre par un écouteur téléphonique plus commode et sensible. Examinant de nombreux électrolytes – acides, bases et sels, purs et en solution aqueuse – KOHLRAUSCH vérifie la loi d'Ohm et détermine les résistances en fonction de la température et de la concentration  $C$ . En pratique, il envisage la conductivité molaire  $\Lambda$  (en  $\Omega^{-1} \text{ m}^2 \cdot \text{mol}^{-1}$ ) pour établir des lois empiriques, montrant notamment que les courbes  $\Lambda=f(\sqrt{C})$  sont généralement linéaires. Par extrapolation de ces graphes, il caractérise chaque électrolyte par la valeur limite  $\Lambda^\circ$  de la conductivité à concentration nulle ; la comparaison des résultats le conduit alors à énoncer sa « loi de migration indépendante des ions » (1876) : « dans une solution diluée, chaque élément électrochimique a une résistance qui lui est parfaitement caractéristique, indépendante du composé dont il est électrolysé » ; plus précisément,  $\Lambda=F(\mu_++\mu_-)$  où  $\mu_+$  et  $\mu_-$  représentent les mobilités ioniques et  $F$  est la constante de FARADAY. Dans les années qui suivent, les vues de KOHLRAUSCH sont complétées par la théorie de dissociation électrolytique d'ARRHENIUS ; d'après le jeune chercheur suédois, qui travaille au laboratoire de Würzburg en 1887, la dissociation est complète dans les solutions à très faible concentration, mais

partielle à concentration finie ; on doit donc avoir  $\Lambda = \alpha \Lambda^\circ$ , où  $\alpha$  est le degré de dissociation qui dépend de la concentration. Reste alors à préciser la variation de  $\alpha$  avec  $C$  ce qui est fait avec succès en 1888 par W. OSTWALD en invoquant la loi d'action de masse pour la réaction d'équilibre de dissociation-association ionique. Tel est l'état de ce domaine de recherche, clairement défriché par les approches expérimentales de KOHLRAUSCH, quand celui-ci accepte la direction de l'Institut de physique strasbourgeois.

À Strasbourg, KOHLRAUSCH maintient le même domaine comme objet prioritaire de ses recherches. Fidèle à son esprit de « physicien de la mesure », la phase initiale d'émergence de connaissances nouvelles doit maintenant être suivie par une phase d'approfondissement en améliorant et en complétant ses mesures de résistance électrique des électrolytes. Il confirme ainsi sa loi de migration indépendante des ions aux faibles concentrations et, en multipliant les expériences, complète la liste des contributions caractéristiques des divers anions et cations à la conductivité  $\Lambda$  et évalue les mobilités correspondantes  $\mu_{\pm}$  (1893). Parmi ses proches collaborateurs expérimentateurs figurent son jeune frère Wilhelm ainsi que son gendre W. HALLWACHS qui, l'un et l'autre sont d'anciens élèves de KUNDT. Son effort est aussi accompagné par le théoricien E. COHN, qui, entre 1884 et 1889, a publié des travaux sur les propriétés de conduction et les constantes diélectriques d'électrolytes.

En 1894, avec A. HEYDWEILLER, il parvient à déterminer les faibles conductivité et dissociation ioniques dans l'eau pure : avec de l'eau de plus en plus purifiée, les valeurs mesurées de la conductivité  $\Lambda$  tendent vers une valeur minimale ( $1,05 \times 10^{-10} \Omega^{-1} \text{m}^2 \text{mol}^{-1}$  à  $25^\circ \text{C}$ ) d'où l'on déduit le degré de dissociation  $\alpha = \Lambda / \Lambda^\circ (1,92 \times 10^{-9})$ , compte tenu de la valeur de  $\Lambda^\circ$  déduite de la somme des contributions de  $\text{H}^+$  et  $\text{OH}^-$ , connues par ailleurs ; les auteurs trouvent aussi que les variations observées sur un large intervalle de température sont interprétées en admettant, pour la dissociation ionique, un mécanisme d'activation thermique, dont la constante de vitesse a la forme d'une équation d'ARRHENIUS. « Maître de la mesure » en recherche fondamentale, l'autre caractéristique du futur responsable de la *Physikalisch-Technische Reichsanstalt* est le souci des applications à d'autres domaines scientifiques ou techniques. À Strasbourg KOHLRAUSCH aborde ainsi, avec ses collègues de l'Institut de chimie, des problèmes de chimie analytique inaccessibles aux méthodes étudiées la solubilité dans l'eau de sels et de verres trop peu solubles pour être dosés par les procédés chimiques ordinaires ; c'est en mesurant la conductivité  $\Lambda$  dans les solutions en équilibre avec le solide MX qu'il détermine avec précision le produit  $[\text{M}^+].[X^-]$  des concentrations d'ions dissous pour près d'une trentaine de produits (18).

KOHLRAUSCH présentera le bilan de sa vingtaine d'années de recherches sur les électrolytes dans sa monographie *Das Leitvermögen der Elektrolyten : mathematische Resultate und Anwendungen* (1898), qu'il prépare à Strasbourg. Dans le développement décisif de la physico-chimie des matériaux au 19<sup>e</sup> siècle finissant, sa contribution est d'importance. Ses premiers travaux à Würzburg et ceux qu'il a inspirés à ARRHENIUS inaugurent l'avènement de la chimie physique, qui s'établira comme discipline autonome dès la dernière décennie du siècle sous l'impulsion de W. OSTWALD et de J.H. van't HOFF, puis de W. NERNST, dont KOHLRAUSCH avait dirigé la thèse à Würzburg (39,40). Le travail de KOHLRAUSCH conforte par ailleurs les conceptions atomistes pour les porteurs de charge en milieu dense. La signification de l'idée que, dans l'électrolyse, les charges électriques sont des particules réelles est explicitement soulignée, dès 1881, par HELMHOLTZ : « nous ne pouvons éviter de conclure que l'électricité, aussi bien positive que négative, est divisée en particules élémentaires définies, qui se comportent comme des atomes d'électricité ». La même année, J. STONEY publie indépendamment la même idée, avec un calcul encore imprécis de la valeur de la charge élémentaire qu'il nommera « électron » en 1891. On sait que la caractérisation définitive de l'électron suivra à la fin du siècle dans les études sur les décharges électriques dans les gaz et les rayons cathodiques (34).

$ABC$  soll die Verzweigungswiderstände bedeuten, sei es einen gespannten Draht mit Schleifcontact oder zwei constante Widerstände (vgl. 71b, wo auch die Bemerkungen über die Vertauschung von Stromquelle und Strommesser, Abgleichung der Verbindungsdrähte u. s. w. nachzusehen sind).

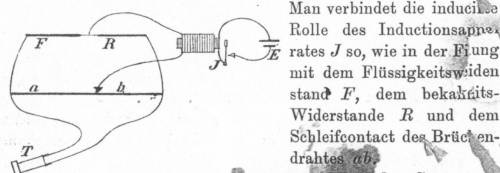
Wenn das Dynamometer keinen Ausschlag gibt, so gilt

$$F:R = AB:BC.$$

Im Interesse der Empfindlichkeit kann die bewegliche Rolle des Dynamometers bei Wechselströmen an einem Drahte hängen und die andere Zuleitung durch eine in verdünnte Schwefelsäure (15%) tauchende platinirte Platin-Elektrode geschehen. Durch die Oberfläche der Flüssigkeit soll wegen der Reibung nur ein Draht central hindurchtreten.

Ueber Senkrechtstellung der Rollen vgl. 66a I.

Telephon. Das Bell'sche Telephon ist ein bequemes, empfindliches Reagens auf das Vorhandensein rascher Wechselströme.



Man verbindet die inducirte Rolle des Inductionsapparates  $J$  so, wie in der Figur mit dem Flüssigkeitswiderstand  $F$ , dem bekakéits-Widerstand  $R$  und dem Schleifcontact des Brücken-drahtes  $ab$ .

Wird der Contact  $T$  so gestellt, dass das Telephon  $T$  schweigt, so verhält sich  $F:R = a:b$ .

Nicht jedes Telephon ist geeignet. Die Empfindlichkeit hängt von der Stärke seines Magnets, von der Beschaffenheit und der Stellung der Blechplatte und von dem Widerstande seiner Drahtwindungen ab. Zuweisen findet man ein ganz ordinäres wohlfeiles Telephon brauchbar. Anwendung weicher Zuleitungsdrähte zum Telephon, hinreichende Entfernung des Unterbrechers, Verstopfen des einen Ohres mit Baumwolle sind zweckmäßig, um störende Geräusche fernzuhalten. Von dem Inductionsapparat muss man das Telephon hinreichend entfernen, weil sonst Erregung durch Fernwirkung eintreten kann.

Das Ton-Minimum. Unter Umständen verschwindet der Ton bei keiner Stellung des Contacts vollständig. Bei guten

Elektroden in Widerständen mittlerer Größe, von 20 bis 1000 Ohm etwa, soll das Minimum scharf erscheinen. Die Ursachen von Unschärfe können verschiedene sein. Reste von Polarisation an den Elektroden werden besonders bei kleinen Flüssigkeitswiderständen nachteilig wirken können. In Rheostatenwiderständen von vielen Windungen können einestheils Extraströme (Selbstinduction), anderenteils aber elektrostatische Ladungen (Capacität) stören, letztere besonders bei sorgfältiger bifilarer Wicklung. Es kann daher vorteilhaft sein, dass Drahtrollen von vielen Windungen (1000 Ohm und mehr) nicht sorgfältig gewickelt sind: dass die beiden Drahthälften etwa unregelmäßig miteinander aufgelaufen sind oder dass man einen Draht gewickelt und nur nach jeder Windungslage die Richtung gewechselt hat (Chaperon). Auch das Bad, in welches ein schlecht leitender Elektrolyt eingesetzt ist, kann zu Ladungserscheinungen Veranlassung geben, welche sich bei der Anwendung von destillirtem Wasser oder mehr noch Petroleum vermindern.

Ist das Minimum der Tonstärke noch deutlich ausgeprägt, man ohne merklichen Fehler auf den Punkt schwächsten

Ist es stark verwischt, so wird erstens die Einstellung genau, und zweitens können aus den Nebenumständen unklarheiten entstehen, die aber meistens unbedeutend sind.

Die Widerstandsgefäße. Soll eine vollständige, unabhängige Bestimmung des Leitungsvermögens gemacht werden, so muss die Flüssigkeit in ein Gefäß eingefüllt sein, dessen Widerstandscapacität sich berechnen lässt, also wohl in ein cylindrisches Rohr von bekanntem Querschnitt. Beträgt der letztere 1 cm bis 20 cm, so kann man gerade so wie unter I (S. 300) Differenzbeobachtungen anwenden und ist von allen Voraussetzungen unabhängig. Ein engeres cylindrisches Rohr kann als Verbindung zweier Gefäße, in denen die Elektroden stehen, angebracht sein, ähnlich wie die letzte Figur (f. S.). Der  $i$  ist zu der Widerstandscapacität des Rohres die Ausbreitung in die Gefäße hinzuzufügen (S. 299).

Bequemer sind Gefäße wie Fig. f. S. (die drei ersten für sehr schlecht leitende Flüssigkeiten; die dritte Form von Arrhenius), deren Capacität  $\gamma$  man folgendermaßen empirisch bestimmt.

Empirische Bestimmung der Widerstandscapacität

Le Leitfaden der praktischen Physik de F. KOHLRAUSCH est le document présent sur les tables de travaux pratiques des Instituts de physique allemands. À Strasbourg, l'exemplaire de l'édition de 1892, provenant de l'auteur a beaucoup servi : les pages consacrées à la mesure des résistances d'électrolytes par le pont de Kohlrausch sont abîmées par les solutions acides ...

L'intérêt personnel que KOHLRAUSCH accorde à la physique des mesures se manifeste aussi dans son activité d'enseignant. Le choix de ses enseignements à l'Institut de physique de Strasbourg est révélateur : il se réserve le cours de physique expérimentale (5 heures hebdomadaires) ainsi que les travaux pratiques au laboratoire pour débutants (12 h) et pour étudiants confirmés (39 h). Son « Guide de la physique pratique » est constamment mis à jour avec les huit éditions qui se suivent pendant sa période universitaire, de Göttingen à Strasbourg (1870-1895). Plus tard, quand il s'éloigne de l'université pour diriger l'institution de recherche pure et appliquée – mais sans mission explicite d'enseignement – qu'est la *Physikalisch-Technische Reichsanstalt*, KOHLRAUSCH poursuit néanmoins son effort de promotion d'une formation universitaire de pointe en physique expérimentale, destinée aux enseignants, chercheurs et ingénieurs requis par le développement de son pays : il rédige un traité entièrement remanié pour tenir compte de l'extraordinaire épanouissement de la physique des mesures et de la technologie instrumentale en Allemagne au tournant du siècle ; son *Lehrbuch der praktischen Physik*, qui paraît en 1901, connaîtra un succès universel avec ses neuf éditions successives, figurant comme ouvrage de référence dans toutes les bibliothèques de physique et de chimie-physique au début du 20<sup>e</sup> siècle.

À l'Institut de physique strasbourgeois, selon l'usage établi, la compétence prioritairement expérimentale du directeur est complétée par celle plus théorique du professeur associé ; KOHLRAUSCH retrouve ainsi COHN, déjà en fonction à ce titre avec KUNDT. Pour les enseignements, si KOHLRAUSCH assure la solide formation de physique expérimentale déjà

mentionnée, COHN se charge des cours de Physique théorique (3 heures hebdomadaires) et de Théorie de l'électricité et du magnétisme (3 h) ; le programme est complété par un enseignement sur la Chaleur du maître de conférences HALLWACHS (41).

Emil COHN est directement impliqué dans le mouvement d'assimilation, par les physiciens allemands, de la vision de FARADAY et MAXWELL du champ électromagnétique et de ses conséquences unificatrices pour l'électricité, le magnétisme et la lumière. L'adhésion à la théorie de MAXWELL se généralise à partir des années 1880 à la suite des confirmations expérimentales qui s'accumulent dans tous ces domaines, avec, en particulier les travaux décisifs sur les ondes électriques de HERTZ (1886). Mais la théorie est encore mal comprise ; en effet le *Treatise on electricity and magnetism* où, en 1873, MAXWELL avait rassemblé l'essentiel de ses recherches, n'a pas été rédigé avec suffisamment de soin pédagogique dans la présentation de la construction conceptuelle et le choix du formalisme mathématique. L'élaboration d'un traitement théorique clarifié, adapté aux besoins de la recherche et de l'enseignement du moment, est alors une tâche urgente : elle est abordée par HEAVISIDE en Angleterre (1885), puis développée en Allemagne par HERTZ et COHN. Les travaux des deux physiciens allemands paraissent ensemble dans les *Annalen de Physik*, 40 (1890), sous les titres *Über die Grundgleichungen der Elektrodynamik für ruhende Körper* (pp. 577-624) pour HERTZ et *Zur Systematik der Elektrizitätslehre* (pp. 625-639) pour COHN (21, chap.17). Avec leur nouvelle présentation théorique, les auteurs relativisent la signification des modèles mécaniques et du rôle de l'éther pour relever les propriétés de symétrie des champs et leur expression dans la forme des équations de MAXWELL, qui est celle que nous connaissons actuellement. Dès 1893, BOLTZMANN – également très sensibilisé par le problème – dans son texte *Über die Methoden der theoretischen Physik* note que « dans le travail de MAXWELL, les formules se détachent de plus en plus du modèle, un processus achevé par HEAVISIDE, POYNTING, ROWLAND, HERTZ et COHN » ; il souligne ainsi l'impact rapide de cette œuvre collective, et accorde une part significative au physicien strasbourgeois, laquelle sera souvent oubliée par la suite. Au service de l'enseignement de la version modernisée de l'électromagnétisme, COHN publie plusieurs ouvrages, dont un volumineux traité *Das Elektromagnetische Feld* (1900) ; en 1913 paraît son *Physikalisches über Raum und Zeit*, un livre que EINSTEIN recommandera pour une introduction à sa théorie de la relativité restreinte (42).

En 1894, l'Université allemande doit remplacer trois de ses figures dirigeantes – KUNDT, HERTZ et HELMHOLTZ – qui viennent de décéder. Dans l'important mouvement académique qui s'ensuit, l'Institut de physique strasbourgeois est concerné puisque KOHLRAUSCH est désigné pour succéder à HELMHOLTZ à la tête de la *Physikalisch-Technische Reichsanstalt*. Cet établissement, directement rattaché à l'administration impériale, a été créé en 1887 pour réaliser des opérations lourdes de recherche, de transfert et de technologie et de métrologie avancée, difficilement accessibles aux laboratoires universitaires ; richement doté et disposant de chercheurs à temps plein, il est devenu en quelques années, sous la direction de HELMHOLTZ, un centre de réputation mondiale, symbole de l'excellence de la physique et de la technologie allemandes. Le profil scientifique et les qualités d'administrateur du physicien strasbourgeois sont parfaitement adaptés pour prendre le relais : sous sa direction (1895-1905), l'Institut impérial affermira, au tournant du siècle, sa position d'établissement scientifique et technologique de référence, servant d'ailleurs de modèle pour le *National Physical Laboratory* britannique (créé en 1900) et le *Bureau of Standards* américain (1901). Rappelons aussi le rôle crucial joué par les travaux du « laboratoire d'optique des radiations du corps noir » de l'Institut de KOHLRAUSCH dans l'élaboration de la loi de PLANCK (1900).

### **Les années Braun : 1895-1918**

Pour les deux prédécesseurs de Ferdinand BRAUN (1850-1918) à la direction de l'Institut de physique strasbourgeois, le séjour à la *Kaiser-Wilhelm-Universität* est l'avant-dernière étape dans un parcours régulier menant de la formation initiale d'élite vers le sommet des responsabilités scientifiques à Berlin. Pour BRAUN, l'Université de Strasbourg sera plutôt la destination finale

d'élection dans une carrière académique qui semble moins programmée que celle de KUNDT ou de KOHLRAUSCH (14,29,43).



Ferdinand BRAUN (1850-1918)

Les débuts ont lieu sous des auspices favorables car, en 1869, le jeune étudiant venant de Marburg peut finir ses études au haut-lieu berlinois, en participant au Kolloquium et en disposant des moyens expérimentaux de l'École de MAGNUS. Son travail doctoral porte alors sur la physique des vibrations ; dans la phase finale de son étude – sur les effets de retard et de non-linéarité des oscillations de cordes élastiques – il bénéficie de la supervision attentive de HELMHOLTZ qui, depuis 1871, dirige la physique à Berlin. Docteur en 1872, il est d'abord assistant de QUINCKE à Berlin et à Würzburg. Mais les conditions matérielles précaires et les perspectives incertaines le conduisent à accepter un poste dans l'enseignement secondaire, au *Thomas Gymnasium* de Leipzig (1874-1877) ; il est intéressant de noter qu'à la même époque, il est également sollicité par le Gymnase protestant de Strasbourg (29). Paradoxalement, cette parenthèse extra-universitaire est extrêmement fructueuse du point de vue de la recherche ; BRAUN publie en effet une demi-douzaine de contributions concernant non seulement le sujet de sa thèse, mais encore la conduction électrique de sels fondus et, surtout, divers cas de non-validité de la loi d'Ohm, tels des systèmes avec une conduction unidirectionnelle. Il s'agit là d'une découverte majeure, celle des diodes à hétérostructure métal-semiconducteur : dans son dispositif, des cristaux de sulfures métalliques sont en contact avec des électrodes en fil d'argent, dont l'une est appliquée en pointe ; bien qu'il ne comprenne pas encore les détails du phénomène, BRAUN entrevoit l'importance de la couche d'arrêt au contact semiconducteur-métal ; il montre aussi que l'effet se caractérise par un temps de réponse très court. Ses recherches sur les diodes à cristaux se poursuivront jusqu'en 1883, lors de son premier séjour à Strasbourg ; un quart de siècle plus tard, de retour à Strasbourg, il appliquera l'effet redresseur de ses dispositifs pour détecter les signaux de haute fréquence en télégraphie sans fil, dans ses travaux couronnés par le prix Nobel.

L'écho des travaux publiés par le professeur du Gymnase de Leipzig lui vaut d'être rappelé, dès 1877, par l'Université à Marburg, où un poste de professeur associé de Physique mathématique lui est confié ; dans le rapport d'évaluation de sa candidature, HELMHOLTZ souligne la qualité de ses résultats expérimentaux, mais aussi l'étendue et la profondeur de ses connaissances théoriques (21, chap. 15).

Conformément à la vocation théorique de ses nouvelles fonctions, BRAUN élargit alors son champ de recherches par des études de physique mathématique pure (oscillations elliptiques, fonctions sphériques) et par l'analyse thermodynamique des phénomènes électrochimiques dans les piles, dont la compréhension était d'un grand intérêt pratique et théorique à l'époque. On se fonde alors encore sur les anciennes propositions de HELMHOLTZ et de THOMSON des années 1850, admettant une stricte équivalence de l'énergie chimique mise en œuvre et du travail électrique disponible lors du fonctionnement des piles. En 1878, BRAUN montre qu'il n'en est pas ainsi en général : envisageant, pour un ensemble de cellules galvaniques les données électrochimiques disponibles – chaleur ou variation d'enthalpie  $\Delta H$  de réaction, nombre  $n$  de faradays (F) impliqués – il les compare à ses propres mesures de la force électromotrice  $E$  et constate que l'égalité  $\Delta H = nFE$  attendue est généralement non valide. Il en déduit que la chaleur de réaction n'est pas nécessairement transformée intégralement en énergie électrique et qu'il convient d'introduire une grandeur nouvelle, l'« aptitude au travail » (*Arbeitsfähigkeit*) ; l'exacte signification de ce concept se précisera plus tard quand on comprendra le rôle des variations d'entropie : après l'introduction, en 1882, de l'énergie libre de HELMHOLTZ on écrira, pour les piles,  $\Delta G = nFE$  où  $\Delta G$  est l'enthalpie libre de GIBBS introduite un peu plus tôt (40).

En 1880, KUNDT doit remplacer RÖNTGEN dans les fonctions de professeur associé chargé des activités théoriques. Il n'a aucun mal à attirer BRAUN dont la personnalité jeune et brillante le séduit ; réciproquement BRAUN envisage avec plaisir une collaboration avec le jeune directeur de l'Institut-pilote strasbourgeois. Pendant les deux années de son premier séjour à Strasbourg, où la collaboration avec KUNDT tient toutes ses promesses, BRAUN enseigne la « théorie de l'électrostatique et du magnétisme », la « théorie de la capillarité », la « théorie mécanique de la chaleur », la « théorie de la lumière », des « chapitres choisis de la chimie physique », la « mécanique analytique », des « chapitres choisis de la physique théorique » et les « relations entre électricité et chaleur » ; il parcourt ainsi tous les sujets brûlants au 19<sup>e</sup> siècle finissant. Au point de vue de la recherche, il met une dernière main à ses travaux sur l'effet redresseur de ses diodes à jonction et sur la thermodynamique électrochimique des piles pour répondre aux Interrogations et objections suscitées par ses récentes découvertes. En 1883, il quitte Strasbourg pour Karlsruhe, où le Polytechnicum lui offre la chance de devenir professeur titulaire.

L'établissement polytechnique de Karlsruhe, fondé en 1825, est l'un des centres d'enseignement de ce type les plus anciens et prestigieux de l'espace allemand. En ces temps où l'électricité fait une entrée massive dans la vie courante, il est urgent d'adapter la formation d'ingénieur aux exigences du développement de l'industrie électrotechnique, où des acteurs allemands comme SIEMENS jouent un rôle majeur. Mais en vertu du principe d'union Science–Technique cultivé par l'administration universitaire impériale, l'enseignement des sciences pour l'ingénieur doit maintenir le lien avec la physique générale. Le professeur responsable est alors recruté, non pour son expérience en physique appliquée, mais sur son renom de brillant explorateur d'aspects fondamentaux de la physique ; il en sera d'ailleurs de même deux ans plus tard quand HERTZ sera choisi pour succéder à BRAUN (21, chap. 17 ; 29). À Karlsruhe, BRAUN retrouve, comme assistant, A. SCHLEIERMACHER qu'il avait connu à Strasbourg en 1881. Ensemble ils créent l'infrastructure du nouvel enseignement à dominante électrotechnique avec un service de travaux pratiques bien équipé. BRAUN dispense un cours de Physique expérimentale dans lequel il insiste, comme requis, sur les fondements de l'électrotechnique. L'autre centre d'intérêt de l'équipe, qui comprend les premiers doctorants du jeune professeur, est la physique des hautes températures, encouragée par l'industrie métallurgique ; mais BRAUN ne publiera qu'une seule étude – sur la thermoélectricité des métaux fondus – avant son départ pour Tübingen (1885). Pour sa succession, il soutient HERTZ qui répond à l'appel du Polytechnicum, séduit par les conditions de travail désormais disponibles ; la découverte des ondes hertziennes à Karlsruhe sera annoncée trois ans plus tard (1888).

La fonction de professeur dans un établissement polytechnique est souvent le marchepied pour celle de professeur d'université qui est l'aboutissement ultime de toute carrière académique. Aussi, quand l'Université de Tübingen lui offre le poste de professeur de physique en titre, BRAUN n'hésite pas, même si les conditions de travail qu'il va rencontrer sont défavorables comparées à celles qu'il vient de mettre en place à Karlsruhe. Dès son arrivée en 1885, sa tâche principale est la planification et la construction d'un nouvel Institut de physique qui sera prêt en 1889. Pendant cette période,

il reprend les recherches de nature thermodynamique, qui ne nécessitent que des moyens expérimentaux modestes. Le problème général qui le préoccupe est celui du comportement d'un système en équilibre soumis à des perturbations externes de volume, de pression, de température, de concentration. Expérimentalement, il prend des solutions saturées de corps solides comme systèmes en équilibre et analyse les variations de la solubilité et de la compressibilité (1885-1887) : si on accroît le volume, ce qui diminue la concentration, le système réagit spontanément en augmentant la concentration ; si on accroît la pression, le système réagit en s'y opposant avec une diminution du nombre de molécules dissoutes ... Tirant le bilan théorique de ses observations, il publie son « énoncé général concernant les variations d'état » (1887) : « Si l'on exerce une contrainte externe sur un système en équilibre, celui-ci réagit dans le sens qui tend à s'opposer à la modification voulue ». Cet énoncé est le « principe de LE CHATELIERBRAUN » des traités actuels de la thermodynamique ; de manière indépendante, BRAUN a en effet établi un résultat déjà signalé en 1884 par le physico-chimiste français. Par la suite, la formulation plus générale du physicien allemand s'est cependant révélée comme particulièrement utile car « exprimée en représentation-entropie, plutôt qu'en représentation-énergie, avec l'addition d'un postulat dynamique, elle est fondamentale dans la théorie des processus irréversibles » (H.B. Callen). Ses autres domaines de recherche à Tübingen incluent l'électrolyse de solutions, la génération d'électricité par déformation mécanique des métaux, l'amélioration des instruments de mesures électriques, la géothermie ... Âgé de 40 ans, BRAUN est désormais reconnu comme un universitaire expérimenté, constructeur d'institut, physicien inventif, avec une réputation d'excellence à la fois comme expérimentateur et théoricien. Dès 1888, son nom avait été mentionné, après celui de KOHLRAUSCH, dans la liste des candidats souhaités par l'Université de Strasbourg pour la succession de KUNDT (33,43). En 1895, quand KOHLRAUSCH est appelé à Berlin, BRAUN accepte l'offre de revenir à Strasbourg pour prendre la direction de l'Institut-modèle de KUNDT qui lors de son séjour antérieur comme professeur associé (1880-1882) n'était encore qu'un chantier.

L'année d'arrivée de BRAUN à Strasbourg est un moment crucial de l'histoire de la physique, où émergent les conceptions classiques sur la nature de l'électricité et la structure électronique de la matière : en 1895, LORENTZ met sa Théorie de l'électron sous sa forme définitive qui interprétera l'effet ZEEMAN dont la découverte est toute proche (1896) ; les recherches expérimentales sur les rayons cathodiques dans les tubes de CROOKES sont en pleine effervescence et annoncent la mise en évidence imminente de l'électron par J.J. THOMSON (1897) ; c'est aussi l'année de la découverte retentissante des rayons X par RÖNTGEN (34). Étudier la nature de ces rayonnements et en découvrir de nouveaux sont alors les thèmes naturels de la recherche dans les meilleurs laboratoires européens. À l'Institut de physique strasbourgeois, BRAUN s'intéresse aussi aux expériences avec les tubes cathodiques, mais selon des directions moins encombrées. En 1896, il songe à utiliser la déviation des rayons cathodiques par un champ magnétique comme moyen d'étude du comportement temporel de courants électriques variables. L'année suivante, il en publie la réalisation pratique, avec son « tube de BRAUN » réalisé selon ses indications par la firme fondée par GEISLER, le pionnier des tubes à vide : le faisceau collimaté de rayons cathodiques est dévié sans inertie notable selon un axe vertical par le champ magnétique créé par le courant variable ; ce mouvement vertical est déployé selon un axe temporel horizontal en visualisant la trace sur le fond fluorescent du tube par réflexion sur un miroir en rotation rapide ou par impression d'un film photographique en mouvement. Deux années plus tard, J. ZENNECK, l'assistant de BRAUN améliorera le dispositif en implantant les électrodes

de balayage horizontal désormais familières dans les oscilloscopes modernes. Le caractère révolutionnaire de l'instrument de BRAUN s'impose rapidement : plus qu'un simple instrument de mesure, il permet de suivre un phénomène dans son changement même, en temps réel sur des échelles de temps inespérées ; l'équipe strasbourgeoise en fera la démonstration en étudiant, en particulier, les propriétés du courant alternatif fourni depuis peu par le réseau de la ville. On connaît l'extraordinaire développement ultérieur des performances et de l'utilisation pratique de l'oscilloscope cathodique lors de l'épanouissement de l'électronique dans les mondes civil et de la recherche.

À Tübingen, lors de la publication en 1887/88 des résultats de HERTZ sur la génération, la propagation et la détection d'ondes électromagnétiques, BRAUN ne semblait pas impressionné outre mesure par l'intérêt fondamental et les perspectives pratiques des travaux de son successeur au Polytechnicum de Karlsruhe (29). À Strasbourg, dix ans plus tard, il est attiré dans le domaine de la communication électromagnétique à distance au hasard d'une demande de rapport d'expertise sur une invention de télégraphe sans fil sous terre et sous l'eau, proposée par un groupe de techniciens strasbourgeois ; participant aux essais sur le terrain, il propose en physicien expérimenté d'immédiates améliorations des méthodes de génération des signaux (1897). Ainsi sensibilisé, il consacre désormais une grande partie de son activité à améliorer les techniques de génération et de détection

des signaux électromagnétiques en télégraphie sans fil dans l'air (TSF) qui, à l'époque, est un enjeu techno-scientifique majeur, dépassant la pure recherche académique. Dans cette aventure, l'esprit d'invention du chercheur universitaire est confronté à l'esprit d'entreprise de l'efficace et médiatique G. MARCONI, avec lequel BRAUN partagera le prix Nobel en 1909.

MARCONI s'était familiarisé avec la physique des ondes hertziennes dans le laboratoire de A. RIGHI qui, à la suite de HERTZ, a développé systématiquement l'« optique des ondes électriques » à Bologne (14). Convaincu de l'importance future de la nouvelle technique de communication à distance, il commence en 1895 ses essais de réalisation pratique. Dans la ligne des idées de HERTZ, il cherche à développer un émetteur plus puissant et un récepteur plus sensible. Pour la réception, il peut déjà utiliser le détecteur très efficace d'ondes hertziennes qu'est le cohéreur de BRANLY-LODGE, mis au point par LODGE (1893) et utilisant l'effet, étudié par BRANLY (1890), de diminution de la résistance électrique d'un « tube à limaille » sous l'influence de signaux électromagnétiques (34). Pour l'émission des ondes, rappelons que l'oscillateur de HERTZ est constitué d'un éclateur formé de deux boules en regard fixées aux extrémités de deux tiges métalliques colinéaires ; chaque tige est connectée aux bornes d'une source de haute tension : si la différence de potentiel dépasse la tension disruptive entre les boules, l'apparition d'une étincelle manifeste l'établissement du courant électrique à travers l'éclateur. Dans le montage de MARCONI, l'une des boules de l'éclateur est fixée à la partie inférieure d'un fil vertical suspendu à un mât et soigneusement isolé ; l'autre boule est reliée à des plaques métalliques dans le sol. Une haute tension générée par un transformateur ou une bobine de Ruhmkorff, commandée par un manipulateur, est appliquée directement aux bornes de l'éclateur ; on produit ainsi des décharges entre les boules au rythme des signaux Morse. Les oscillations de courant ont la forme de sinusoides amorties,  $I = I_0 \exp[-d(t/T)] \sin(2\pi t/T)$ , où  $T = 2\pi(LC)^{1/2}$  et  $d = \pi R(C/L)^{1/2}$  ; C est la capacité du condensateur formé par le fil isolé (l'antenne) et la terre, L la self propre du fil et R la résistance où la contribution de l'étincelle de décharge est notable. En régime stationnaire, l'oscillation électrique a un nœud au sommet de l'antenne et un ventre au sol ; il est alors avantageux d'adopter une « antenne-quart-d'onde » de longueur  $\lambda/4$ , où  $\lambda = cT$  est la longueur d'onde du rayonnement émis. La puissance du rayonnement est proportionnelle à l'intensité du courant dans la décharge, donc à la capacité C ; si celle-ci peut être augmentée en séparant davantage les pôles de l'éclateur, l'avantage reste cependant limité car l'augmentation de la longueur de l'étincelle en accroît la résistance et, par conséquent, les pertes par effet Joule (44). En plus des restrictions ainsi imposées à la puissance rayonnée, l'émetteur de Marconi présente aussi des inconvénients liés à la haute tension

directement appliquée à l'antenne : les exigences impliquées d'isolation électrique très stricte sont souvent difficiles à satisfaire à l'extérieur avec les conditions climatiques variables.

En 1898, BRAUN présente sa propre méthode de génération des ondes hertziennes, qui permet d'éviter les principaux inconvénients du système breveté par MARCONI. Dans l'« émetteur de BRAUN », les fonctions de production du courant électrique oscillant et d'émission du rayonnement sont séparées. La décharge oscillante est produite dans un circuit comprenant l'éclateur, une self L et un condensateur de grande capacité C ; il est alors commode d'augmenter l'énergie disponible avec la capacité et d'utiliser la self pour allonger la durée des oscillations en augmentant la période (T) et en diminuant l'amortissement (d). L'antenne émettrice est couplée aux oscillations électriques par induction et ne pose plus de problèmes particuliers d'isolation électrique ; par ailleurs ses modes propres d'oscillation peuvent être accordés grâce à l'adjonction de selfs (45). En septembre 1899, BRAUN confirme directement la nette supériorité de son système émetteur en le comparant à celui de MARCONI dans des expériences où il monte les antennes émettrices sur la tour de l'Institut de physique et détecte les signaux à une distance de 1km environ, sur un terrain vague situé au-delà de l'église Saint-Maurice sur l'actuel Boulevard de la Marne (29). Alors que l'action monopolistique de la puissante « *Wireless Telegraph and Signal Co* » de MARCONI peine à maîtriser des portées d'émission dépassant une vingtaine de km, les solutions de BRAUN donnent un second souffle au développement de la TSF, avec des portées qui atteindront rapidement de 100 à 300km. Mais les physiciens strasbourgeois doivent alors s'impliquer dans des tâches dépassant le cadre habituel de l'Institut : poursuivre les éprouvantes expérimentations à longue portée en Mer du Nord, pour les assistants CANTOR et ZENNECK ; suivre les démarches administratives et juridiques de protection de brevets d'invention et de mobilisation des financements en constituant une suite de Sociétés (*Telebraun*, Hambourg, 1899 ; *Braun-SiemensGesellschaft*, Berlin, 1900 ; *Telefunken*, Berlin, 1903), pour BRAUN. Outre le problème crucial de la portée d'émission des signaux TSF, l'équipe strasbourgeoise explore aussi les conditions d'émission dirigée par interférence de deux ou plusieurs champs générés en phase par des antennes convenablement disposées (terrain du Polygone, 1901-1906). Après la réalisation de son système émetteur des ondes hertziennes, BRAUN est tout naturellement conduit à appliquer les mêmes idées pour améliorer le système récepteur (1899) ; pour l'essentiel, celui-ci est encore l'antenne munie d'un cohéreur de BRANLYLODGE mise au point au début des années 90 par POPOV. La solution proposée sépare la fonction de réception sur antenne du champ incident de celle de détection des oscillations dans un circuit couplé par induction à l'antenne. L'antenne est connectée à la terre à travers une self et une capacité variable et peut être mise en résonance avec l'onde à recevoir, ce qui augmente l'effet utile et assure la sélectivité des fréquences. La détection des oscillations électriques a lieu dans un circuit oscillant accordable muni d'un élément redresseur du courant et d'un téléphone ; comme redresseurs, BRAUN utilise les diodes à cristaux qu'il avait déjà découvertes et étudiées dans les années 70 et 80 ; leur réponse rapide les rend en effet particulièrement aptes pour détecter les signaux dans le domaine spectral des ondes hertziennes.

En 1909, quand les contributions de MARCONI et BRAUN au développement de la TSF sont couronnées par le prix Nobel, les discours de remerciement des récipiendaires illustrent la différence de leur approche. MARCONI évoque son œuvre d'ingénieur autodidacte dont le brillant parcours de créateur industriel est documenté par une suite de brevets (46). Pour BRAUN, les travaux récompensés sont une opération finalisée dans le cadre plus général de ses recherches sur les oscillations en général et les oscillations électromagnétiques de haute fréquence en particulier (47).



Ferdinand BRAUN (1850-1918)

Directeur de l'Institut de physique de 1895 à 1918. Son École cultive la physique des vibrations et ondes et ses applications électromagnétiques en TSF.

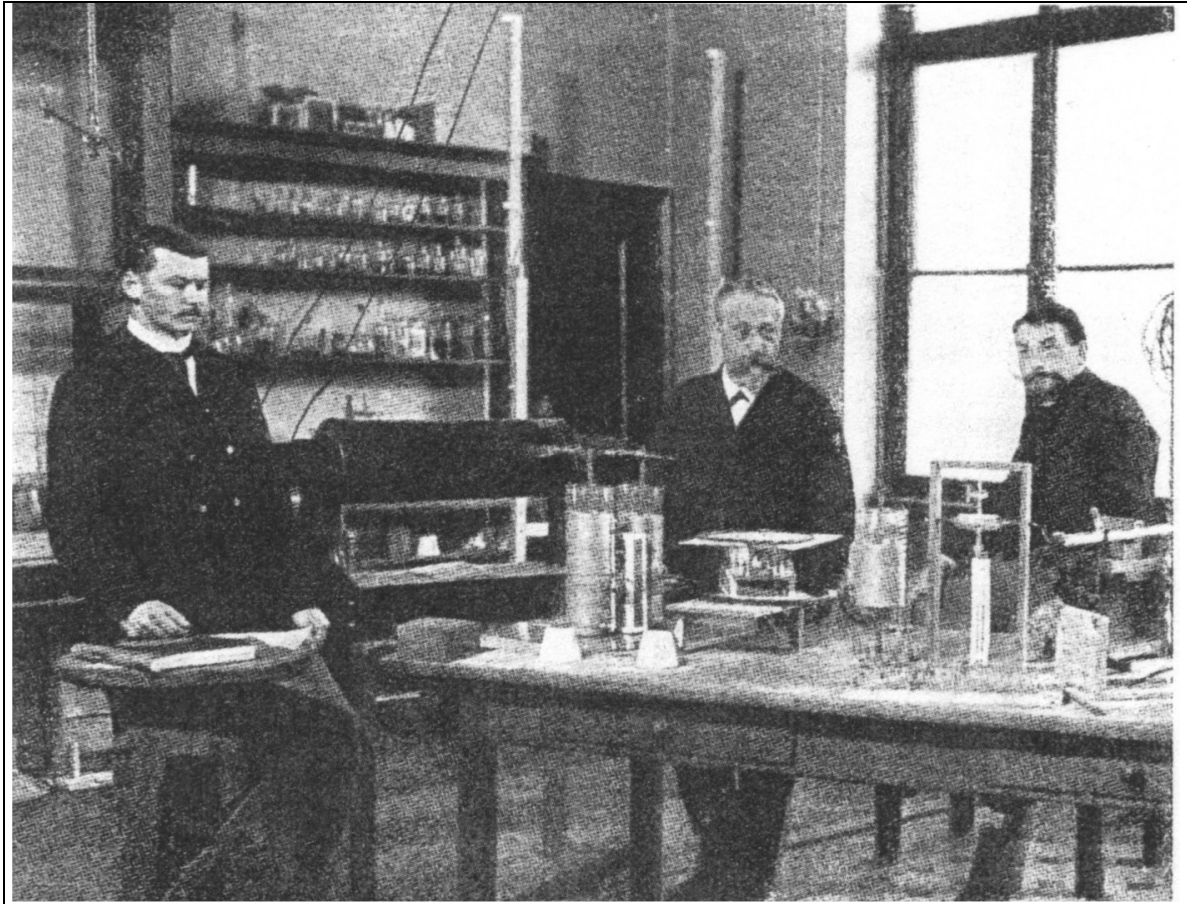
À l'Institut de physique au début du siècle, ce qui est connu comme l'« École de BRAUN » cultive en effet une approche « vibratoire » dans laquelle l'oscillateur est considéré comme le concept fondamental qui détermine l'essentiel des manifestations dynamiques dans l'ensemble des domaines de la physique – mécanique, acoustique, électromagnétique, optique. En pratique, les circuits électriques oscillants fournissent des systèmes-modèles particulièrement commodes pour l'exploration expérimentale de cette physique des oscillations. BRAUN développe ainsi les recherches sur les vibrations de systèmes couplés et étudie les propriétés dynamiques d'oscillateurs électriques en interaction, en considérant la nature – inductive, capacitive, ohmique – du couplage, ainsi que les modes d'excitation – monochromatique, impulsionnelle. Ces travaux suscitent un développement considérable de l'instrumentation et des techniques de mesure de courants variables : l'usage de l'oscillographe cathodique se perfectionne, mais il faut aussi mettre au point des alternateurs de haute fréquence, des condensateurs et selfs variables, des fréquence-mètres ...

En liaison avec leur opération finalisée pour la TSF dirigée, les physiciens strasbourgeois précisent par ailleurs les conditions d'excitation cohérente de plusieurs antennes et d'interférence de plusieurs ondes progressives hertziennes, annonçant les développements ultérieurs de la radio-interférométrie. Ils étudient aussi les méthodes de détection directionnelles qui ouvrent la voie à la radiogoniométrie ; la réception de l'onde a lieu sur un cadre supportant des spires de fil conducteur en série avec un condensateur variable permettant d'accorder le circuit sur la fréquence ondulatoire : conformément à la direction du champ magnétique de l'onde, le courant induit dans le circuit est maximal quand le

plan du cadre est vertical et passe par l'antenne émettrice. Dans des expériences où le dispositif de réception est monté sur la tour de l'Institut de physique, BRAUN et ses assistants réalisent ainsi une mesure absolue du champ généré par l'émetteur de la tour Eiffel en 1913.

Dans sa vision unitaire des fondements de la physique, une étude parallèle des oscillations électriques et optiques – qui sont essentiellement de la même nature, mais se manifestent à des échelles d'espace-temps différentes – est particulièrement séduisante pour BRAUN : pour tout phénomène déjà connu dans l'un des domaines, il convient de mettre en évidence l'analogie dans l'autre (47). Ainsi, il réalise un analogue hertzien de la biréfringence optique avec un faisceau de rayons issus d'un miroir de HERTZ traversant un édifice en couches successives de briques séparées par des couches d'air (1904) : si la longueur d'onde est environ 12 fois l'épaisseur de la couche de pierre, le phénomène apparaît ; une construction d'épaisseur de 2.5 briques se comporte comme une lame quart d'onde transformant une polarisation linéaire en une polarisation circulaire ; en doublant l'épaisseur, la polarisation est à nouveau linéaire, mais dans l'autre quadrant, ... Réciproquement, BRAUN propose une version optique de la fameuse expérience du gril de HERTZ dont le système de fils de cuivre parallèles arrête ou transmet des ondes centimétriques selon que le champ électrique est colinéaire ou normal à ces fils ; dans son procédé, la structure de gril à l'échelle des longueurs d'onde lumineuses est réalisée sur une plaque de verre, perpendiculairement à un fil très mince déposé sur la surface quand celui-ci s'évapore brusquement sous l'influence d'une impulsion intense de courant électrique (1905).

Au début du siècle, l'épanouissement de l'École de BRAUN se traduit par un important accroissement du nombre d'étudiants à l'Institut de physique ; comme à l'époque de KUNDT, l'effectif comprend une proportion notable d'étrangers, mais il commence aussi à bénéficier d'une part autochtone en progression rapide (29). Pendant toutes ces années d'implantation locale et d'expérimentation en Mer du Nord, BRAUN est secondé efficacement par ses assistants CANTOR et ZENNECK qui, comme le directeur, sont logés sur place dans l'Institut. J. ZENNECK (1871-1959) s'attache tout particulièrement au programme scientifique et technique de la TSF en rédigeant un premier traité de plus de 1000 pages, intitulé « *Oscillations électromagnétiques et télégraphie sans fil* » (1901), qui s'imposera comme ouvrage de référence ; dès 1901/02, il inaugure aussi un enseignement spécial de la nouvelle branche scientifique et technique. Mais dans l'Université humboldtienne, toute promotion académique est d'ordinaire soumise à une règle de mobilité : en 1904, ZENNECK va à Danzig où il vient d'être nommé professeur associé ; professeur titulaire à Braunschweig en 1906, il se fixera au Polytechnicum de Munich comme professeur de physique expérimentale en 1913 jusqu'à sa retraite en 1939 ; pendant toute sa carrière, il reste le spécialiste reconnu dans le domaine de ses débuts strasbourgeois. M. CANTOR (1860-1916) avait quitté Strasbourg dès 1903 pour des fonctions de professeur associé de physique théorique à Würzburg, mais il disparaîtra au front en 1916.



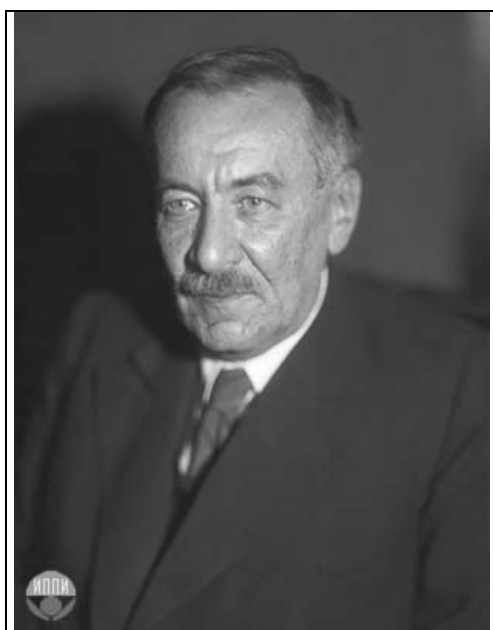
Au laboratoire d'expérimentation avec les oscillations électriques de haute fréquence, BRAUN est entouré par ses proches collaborateurs J. ZENNECK, à sa droite, M. CANTOR à sa gauche.

Lors de la dernière décennie de sa direction de l'Institut, BRAUN trouve en ses élèves russes L.I. MANDELSHTAM (1879-1944) et N.D. PAPALEKSI (1880-1947) ses collaborateurs les plus proches (29,43). Jeunes étudiants attirés par la réputation de l'Institut de physique, ils sont arrivés à Strasbourg en 1899 pour MANDELSHTAM (14,48) et en 1900 pour PAPALEKSI (49). Ils font partie des premiers doctorants dans le nouveau domaine des oscillations électriques et des applications en TSF :

MANDELSHTAM soutient en 1902 une thèse sur la « Détermination de la période de décharge oscillante d'un condensateur » ; PAPALEKSI présente en 1904 une étude théorique et expérimentale d'un « Dynamomètre pour des oscillations électriques rapides ». Malgré leur nationalité, ils bénéficient ensuite d'une carrière académique favorable : recrutés par BRAUN comme assistants, ils sont habilités comme maître de conférence (*Dozent*), dès 1907 pour MANDELSHTAM et en 1911 pour PAPALEKSI. Jusqu'au début de la guerre de 1914/18, quand ils sont rappelés en Russie, ils assurent l'essentiel de l'encadrement des activités d'enseignement et de recherche de l'École de BRAUN ; ensemble, ils prennent une part essentielle aux études déjà mentionnées des oscillations électriques et leurs applications radio-interferométriques et goniométriques avec une prédilection pour les aspects fondamentaux et théoriques quant à MANDELSHTAM, pour les aspects pratiques et appliqués pour PAPALEKSI.

Conformément à l'esprit de l'École de BRAUN, les applications optiques de la physique des oscillations ne sont pas négligées : en 1910, les deux amis étudient l'amortissement des oscillations optiques du sodium en mesurant la durée de fluorescence ; en 1914, MANDELSHTAM réalise l'analogie optique de l'émetteur TSF à la surface terrestre en étudiant les effets d'une source

lumineuse localisée à une distance de l'ordre de la longueur d'onde de la surface de séparation de deux milieux d'indices différents : pour l'interprétation des résultats, il fait appel aux traitements théoriques de ses collègues COHN (1900) et ZENNECK (1907) ainsi que de SOMMERFELD (1909), considérant en particulier des ondes électromagnétiques de surface. Dès ses débuts strasbourgeois, MANDELSHTAM cultive un champ personnel de recherches essentiellement théoriques sur l'interaction des ondes lumineuses avec la matière, où se manifestent pleinement les processus élémentaires de la physique oscillatoire et ondulatoire : résonance, amortissement, modulation, diffusion ... En 1904, il aborde ainsi le problème de la théorie de la dispersion puis relève une erreur dans l'étude de PLANCK de l'atténuation d'un faisceau de lumière par diffusion ; en 1907, sa dissertation d'habilitation porte sur « les milieux optiques homogènes et troubles » ; ensuite, dans la foulée de Lord RAYLEIGH, SMOLUCHOWSKI et EINSTEIN, il se joint aux travaux sur la diffusion lumineuse par les molécules et par les fluctuations dans la matière dense, en considérant l'effet à l'interface de deux milieux, dû aux fluctuations thermiques de la surface (1913).



L.I. MANDELSHTAM (1879-1944)

Élève de l'École de BRAUN, promoteur influent de la physique russe contemporaine.

L'irruption de la première Guerre Mondiale brisera l'Institut de physique de BRAUN, mais non la proximité amicale et professionnelle de ses jeunes collaborateurs russes ; ensemble, ils traversent sur leur sol natal toutes les tourmentes de la première moitié du 20<sup>e</sup> siècle à Odessa, à Petrograd, puis à l'Université de Moscou où MANDELSHTAM prend la direction du Département de physique théorique en 1925 (48,49). Quand dans leur article «*À la mémoire de Ferdinand Braun* » confié à la revue *Die Naturwissenschaften* (1928), MANDELSHTAM et PAPALESKI évoquent l'action et le rayonnement de leur maître, ils se considèrent comme les héritiers de l'École de BRAUN ; toute leur œuvre sera effectivement une élaboration du programme de la physique fondamentale et appliquée des oscillations, défini à Strasbourg.

En poursuivant en Russie leur effort de développement des techniques radio avec l'utilisation notamment des triodes dans les circuits à rétroaction, amplificateurs, générateurs d'oscillations entretenues, harmoniques ou de relaxation, les élèves de BRAUN prennent, pendant les années 1920, la mesure de l'importance des systèmes dynamiques non linéaires. Élaborer « le vocabulaire de base de la théorie non linéaire des oscillations » est alors l'un des premiers objectifs de MANDELSHTAM à Moscou (50) : sous sa direction, A.A. ANDRONOV introduit ainsi les méthodes modernes d'analyse des auto-oscillateurs non linéaires en adaptant les notions mathématiques de cycles-limites dans l'espace des phases dues à POINCARÉ (1927/29) ; c'est le début de l'édification par l'École russe de

l'influent paradigme moderne des oscillations non linéaires, exposé dans l'ouvrage « *La théorie des oscillations* » d'ANDRONOV, VITT et KHAIKIN (1937).



N.D. PAPALESKI (1880-1947)

Elève de l'École de BRAUN, promoteur influent de la physique russe contemporaine.

Dans le domaine de réalisation de nouvelles techniques de radiocommunication, PAPALESKI et MANDELSHTAM suivent la ligne de leurs premiers travaux strasbourgeois et mettent au point, dans les années 1930, de puissantes méthodes interférométriques, fondées sur l'utilisation de rayonnements cohérents avec des fréquences commensurables et la mesure directe de la différence de phase des ondes qui interfèrent : connaissant la phase, on a accès à leur vitesse de propagation, ce qui permet aussi de déterminer des distances et déplacements ; les applications – conduites surtout sous l'impulsion de PAPALESKI – sont nombreuses en radioastronomie, radionavigation et géodésie, ainsi que pour localiser les satellites artificiels (49).

Dans son autre domaine favori, l'optique, MANDELSHTAM poursuit tout aussi activement les recherches commencées à Strasbourg sur la diffusion de la lumière dans la matière. En 1918, il analyse la diffraction des ondes lumineuses par les ondes élastiques introduites par DEBYE dans son travail sur les chaleurs spécifiques (1912), et prévoit l'apparition, dans le spectre diffusé, d'un doublet de raies de part et d'autre de la composante RAYLEIGH. Indépendamment, L. BRILLOUIN publiera en 1922 sa description détaillée du même effet qu'il avait déjà entrevu en 1914 (51) ; on sait que le phénomène est désigné généralement par « diffusion BRILLOUIN », sauf en Russie où l'on parle de « diffusion MANDELSHTAM-BRILLOUIN ». Quand, en 1928, MANDELSHTAM et son collègue G.S. LANDSBERG cherchent la confirmation expérimentale des prévisions théoriques en étudiant la diffusion de lumière dans des cristaux moléculaires, ils trouvent effectivement un effet, mais avec un écartement de raies supérieur à celui prévu pour les ondes élastiques acoustiques ; ils invoquent alors les vibrations infrarouges moléculaires pour interpréter les résultats. La même année, la même observation est faite dans les milieux gazeux et liquides par les physiciens indiens C.V. RAMAN et K.S. KRISHNAN, qui ont cherché un analogue optique de l'effet

COMPTON. Si, curieusement, l'histoire n'a retenu que RAMAN avec son prix Nobel en 1930, la découverte de l'effet par les deux équipes est incontestablement simultanée, en février 1928. Auprès de MANDELSHTAM, les travaux expérimentaux sont par ailleurs accompagnés d'un programme d'approfondissement théorique des phénomènes de diffusion de la lumière, avec la collaboration de ses élèves M.A. LEONTOVICH et I.E. TAMM, qui seront parmi les figures majeures de la brillante

École de physique théorique russe au 20<sup>e</sup> siècle. On peut noter encore que c'est à l'instigation de MANDELSHTAM et LANDSBERG que E.F. GROSS entreprendra en 1930 les expériences décisives démontrant l'existence de l'effet BRILLOUIN.

À Strasbourg, en juillet 1914, le début de la guerre marque aussi la fin de l'activité scientifique à l'Institut de physique de la *Kaiser-Wilhelm-Universität Strassburg*. La ville frontalière subit les mesures d'exception de mobilisation et d'évacuation qui dispersent les étudiants et enseignants. De plus, après le départ de ses proches collaborateurs russes, BRAUN doit entreprendre un périlleux voyage aux Etats-Unis qui sont encore étrangers au conflit : il doit contrer son confrère prix Nobel dans un procès où la Société anglaise de MARCONI conteste à la Société allemande *Telefunken* le droit d'émettre à partir de sa station de Long Island ; retenu à New-York, il y décèdera loin des siens en avril 1918. COHN reste à son poste jusqu'à la fin de la guerre ; il sera ensuite nommé professeur titulaire de physique théorique à Rostock puis à Fribourg, mais sera victime des mesures antisémites de Hitler en 1935 et finira ses jours en Suisse.

Au 22 novembre 1918, l'entrée des troupes françaises à Strasbourg est saluée avec enthousiasme par la population qui a souffert des rigueurs de l'administration militaire mise en place pendant la guerre. La *Kaiser-Wilhelm-Universität* ferme ses portes le 7 décembre, et les enseignants allemands ainsi que certains alsaciens doivent passer le Rhin sans délai, dans des conditions parfois indignes. Avec le traité de Versailles (juin 1919), qui consacre la réintégration de l'Alsace-Lorraine dans l'unité française, c'est aussi le retour de l'Université française avec ses facultés ; l'évènement est célébré officiellement lors de la cérémonie d'inauguration du 22 novembre 1919 au Palais universitaire par le Président de la République Raymond POINCARE : « il faut que l'Université de Strasbourg soit, après la victoire de la France, plus prospère et plus florissante qu'elle ne l'était sous la domination allemande ».

Le nouvel Institut de physique conserve le bâtiment construit par KUNDT et reprend progressivement les enseignements et les activités de recherche sous la direction de Pierre WEISS. Mulhousien de naissance, bénéficiant d'une formation scientifique biculturelle, germanique à Zürich et française à Paris, ce savant dont la réputation est déjà établie fera de son laboratoire le haut-lieu d'étude du magnétisme que l'on sait (7). Mais, hormis les murs, l'Institut gardera peu de traces de la brillante période qui précède, sans doute sous l'influence du manichéisme nationaliste de l'époque. Alors que la mémoire de l'œuvre des KUNDT, KOHLRAUSCH et BRAUN s'efface à Strasbourg, elle est cependant présente en Allemagne et en Russie où, nous l'avons vu, les nombreux élèves des Écoles de physique strasbourgeoises participent efficacement à l'édification de la physique du 20<sup>e</sup> siècle.

## RÉFÉRENCES

- (1) F. L'Huillier, *Histoire de l'Alsace*, PUF, Que sais-je, 1965
- (2) B. Vogler, *Histoire culturelle de l'Alsace*, La Nuée Bleue, Strasbourg, 1994
- (3) G. Livet, *Histoire de l'Université de Strasbourg* in *Encyclopédie de l'Alsace*, Publitotal, Strasbourg, 12 (1986) 7476
- (4) *Les Sciences en Alsace (1538-1988)* (dirigé par H. Durantou) Oberlin, Strasbourg, 1989
- (5) H. Barreau, *Introduction, la science dans une région, dans des institutions*, in (4). 7 -
- (6) G. Frick, *La physique, les physiciens et l'Alsace*, in (4), p. 77
- (7) C. Demangeat et P. Léonard, *Pierre Weiss et l'Institut de physique de Strasbourg entre les deux guerres*, in (4), p. 88 ; livret de l'exposition « *Éléments d'histoire du magnétisme* », Paris, 1988
- (8) *Histoire des universités en France* (dirigé par J. Verger) Privat, Toulouse, 1986
- (9) *Histoire du Gymnase Jean Sturm* (dirigé par P. Schang et G. Livet), Oberlin Strasbourg, 1988
- (10) G. Meyer, *Die Entwicklung der Strassburger Universität aus dem Gymnasium der Akademie des Johann Sturm*, Frankfurt, 1926
- (11) J.P. Friedelmeyer et A. Fuchs, *L'activité mathématique à Strasbourg et en Alsace (de 1538 à nos jours)* in (4), p. 33
- (12) A. Acker, *450 ans d'astronomie en Alsace*, in (4), p. 49
- (13) W. Shea, *La révolution galiléenne*, Seuil, Paris, 1992
- (14) *Dictionary of scientific bibliography*, Charles Scribner's Sons, New-York, 1981
- (15) M.J. Nye, *Before big science. The pursuit of modern chemistry and physics (1800-1940)*, Twayne Publishers, New-York, 1984
- (16) *Éléments d'histoire des sciences* (dirigé par M. Serres) Bordas, Paris, 1989
- (17) B. Bensaude-Vincent, *Lavoisier : une révolution scientifique*, in (16), p. 363
- (18) P. Federlin, *La chimie, une passion des scientifiques strasbourgeois et alsaciens*. in (4), p. 99
- (19) G. Livet, *L'Université de Strasbourg, de la Révolution française à la Guerre de 1870*, Presses Universitaires de Strasbourg, 1996

- (20) V. Karady, *De Napoléon à Duruy : les origines et la naissance de l'université contemporaine*, in (8), p. 261
- (21) C. Jungnickel et R. MC Cormmach, *Intellectual mastery of nature*, The University of Chicago Press, 1986
- (22) J. Gandouly, *Pédagogie et enseignement en Allemagne*, Presses Universitaires de Strasbourg, 1997
- (23) B. Bensaude-Vincent, *Mendeleiev : histoire d'une découverte*, in (16), p. 447
- (24) F. Leprieur, *La formation des chimistes français au XIX<sup>e</sup> siècle*, La Recherche (1979), n° 102, p. 732
- (25) S. Jonas, A. Gérard, M.N. Denis et F. Weidmann, *Strasbourg, capitale du Reichsland et sa nouvelle Université (1871-1918)*, Oberlin, Strasbourg, 1995
- (26) H. Titze, *Wachstum und Differenzierung der deutschen Universitäten (1830-1945)*, Vandenhoeck & Ruprecht, Göttingen, 1995, p. 510
- (27) B. vom Brocke, *Friedrich Althoff in : Wissenschaftspolitik in Berlin* (hrsg von W. Trene, K. Gründer) Colloquium Verlag Berlin, 1987, p. 195
- (28) S.L. Wolff, *August Kundt (1839-1894), Die Karriere eines Experimentalphysiker*, Physis, 29 (1992) 403-446
- (29) F. Kurylo, *Ferdinand Braun. Leben und Wirken des Erfinders der Braunschen Röhre*, Heinz Moos Verlag, München, 1965
- (30) Le principe d'une collaboration de Kundt avec son collègue mathématicien E.B. Christoffel (1829-1900), spécialiste de physique mathématique s'est rapidement avéré comme peu réaliste. À L'Institut de mathématiques, cette spécialité s'intéressait essentiellement aux propriétés formelles des équations différentielles aux dérivées partielles selon une tradition inaugurée par les cours de Riemann et aboutissant au fameux traité de Courant et Hilbert. H. Weber (1842-1913), autre mathématicien de premier plan à Strasbourg, y composera l'influent traité « *Die partiellen Differential Gleichungen der Mathematischen Physik (Mach Riemann's Vorlesungen)* », Vieweg, 1901. On sait que Christoffel est à l'origine des « symboles de Christoffel » de l'analyse tensorielle, utilisés en introduisant la dérivée covariante des vecteurs et tenseurs ainsi que l'équation des géodésiques en coordonnées curvilignes.
- (31) La même découverte est faite indépendamment par le danois Christiansen à la même époque. En 1862, le français F.P. Roux avait déjà observé que la vapeur d'iode réfracte plus fortement le rouge que le bleu.
- (32) A. Einstein, *Emil Warburg als Forscher*, *Naturwissenschaften* **10** (1922) 823
- (33) A. Fölsing, *Wilhelm Conrad Röntgen*, Carl Hauser Verlag, 1995

- (34) R. Taton, *Histoire générale des Sciences ; t. 3 La science contemporaine*, vol. **I** : le XIX<sup>e</sup> siècle, PUF, 1981
- (35) Il faut signaler que, en 1880, H. Becquerel publie des résultats analogues obtenus indépendamment.
- (36) M. Jammer, *The conceptual development of quantum mechanics*, Mc Graw-Hill, New-York, 1966
- (37) Yu A. Khramov, *Petr Nikolaevich Lebedev and his school* (On the 120<sup>th</sup> anniversary of the year of his birth), *Sov. Phys. Usp* **29** (1986) 1127
- (38) La paternité de la découverte de l'effet photoélectrique sera aussi revendiquée par l'italien A. Righi à Padoue.
- (39) B.** Wojtkowiak, *Histoire de la Chimie*, Lavoisier, Paris 1984, chap. 7
- (40) K.J. Laidler, *The world of physical chemistry*, Oxford Un. Press, 1993
- (41) En 1892-1893, l'Institut de physique propose également des cours sur les Fondements de l'électrostatique (Hallwachs, 2 heures hebdomadaires) et la Théorie du potentiel (Reye, 4 h), ainsi que des séances de formation pratique pour les médecins. L'Institut annonce enfin un programme de Conférences publiques (2 h).
- (42) A. Einstein, *Die Relativitätstheorie*, in : *Kultur der Gegenwart : Physik* (éd. E. Warburg), Teubner, Berlin, 1915, p. 703
- (43) F. Hars, *Ferdinand Braun (1850-1918), Ein wilhelminischer Physiker*, GNT Verlag, Berlin, 1999
- (44) Les valeurs numériques typiques des premiers émetteurs de MARCONI sont  $T = 4 \times 10^{-7}$  s et  $\lambda = 120$  m ; la portée des signaux détectables est alors 800 m (29)
- (45) F. Braun, *Die drahtlose Telegraphie*, in : *Kultur der Gegenwart Physik* (éd. E. Warburg), Teubner, Berlin, 1915, p. 359
- (46) M.G. Marconi, *Nobel Lecture* in : *Les Prix Nobel en 1909*, Stockholm, 1910
- (47) F. Braun, *Nobel Lecture* in : *Les prix Nobel en 1909*, Stockholm, 1910
- (48) S.M. Rytov, *Leonid Isaakovich Mandel'shtam*, *Sov. Phys. Usp.* **22** (1979) 826
- (49) V.V. Migulin, *N.D. Papaleksi (100 anniversary of his death)*, *Sov. Phys. Usp* **24** (1981) 614
- (50) A.V. Gaponov-Grakhov et M.I. Rabinovich, *L.I. Mandel'shtam and the modern theory of non-linear oscillations and waves*, *Sov. Phys. Usp.* **22** (1979) 590
- (51) R.** Mosseri, *Léon Brillouin, à la croisée des ondes*, Belin, Paris, 1999