



Gabriel Lippmann

Commémoration

par la
section des
sciences naturelles,
physiques et
mathématiques
de l'Institut
grand-ducal
de Luxembourg
du 150e
anniversaire
du savant
né au Luxembourg
lauréat du
prix Nobel en 1908

J.-P. Pier

et

J.A. Massard

éditeurs

Luxembourg
1997

Jean-Paul PIER & Jos. A. MASSARD

éditeurs

GABRIEL LIPPMANN

(1845-1921)

Commémoration

*par la section des sciences naturelles,
physiques et mathématiques
de l'Institut grand-ducal de Luxembourg
du 150e anniversaire
du savant né au Luxembourg,
lauréat du prix Nobel en 1908*

**Section des sciences naturelles, physiques et mathématiques
de l'Institut grand-ducal de Luxembourg**

en collaboration avec

**le Séminaire de mathématique
et le Séminaire d'histoire des sciences et de la médecine
du Centre universitaire de Luxembourg**

Luxembourg 1997

Ouvrage édité avec le soutien financier des organismes suivants:

**Fonds culturel national, Ministère de la Culture
Ville de Luxembourg
Banque et Caisse d'Épargne de l'État
Crédit Européen**

© Section des sciences naturelles, physiques et mathématiques
de l'Institut grand-ducal de Luxembourg
162A, avenue de la Faïencerie, L-1511 Luxembourg

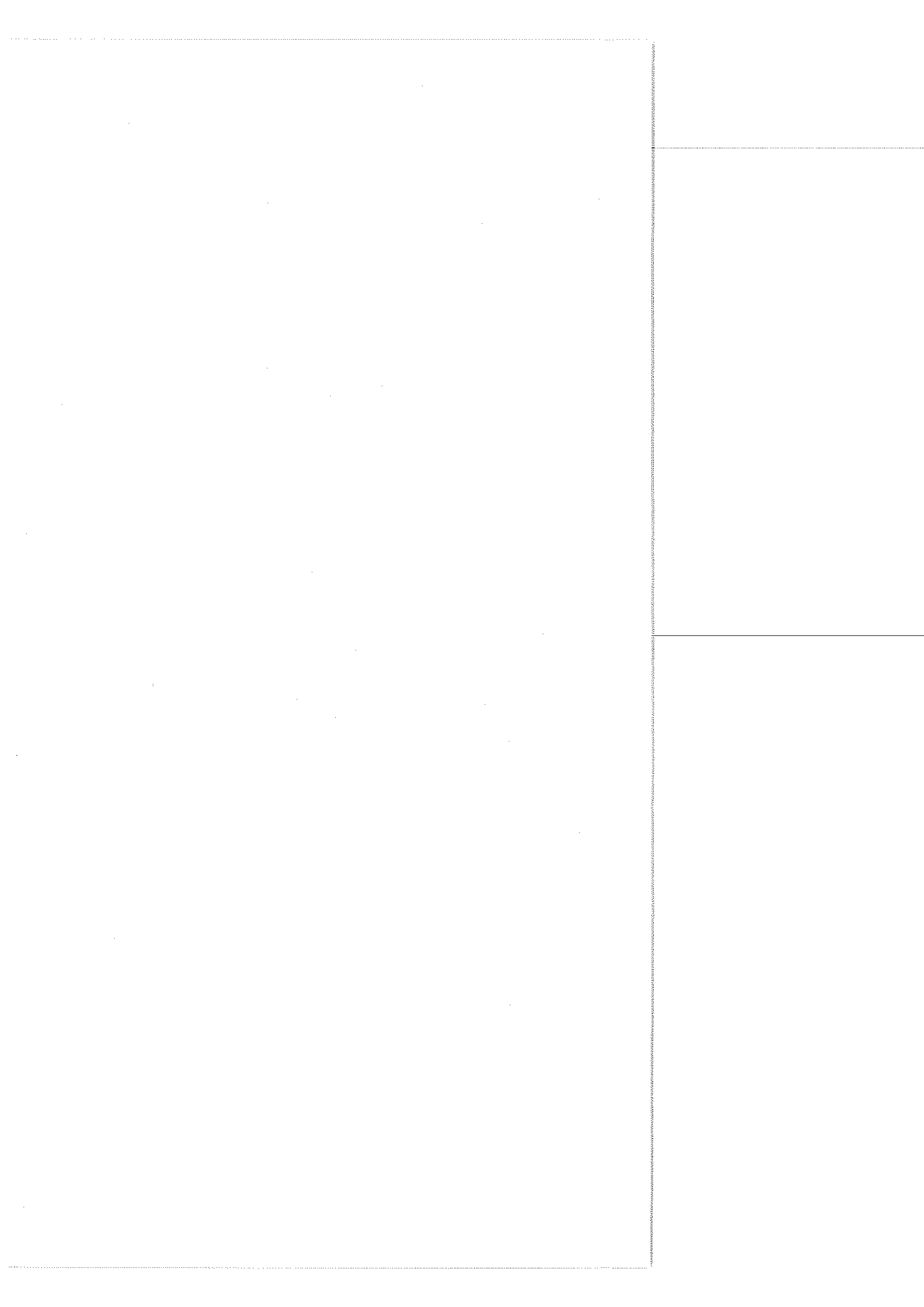
Imprimerie de la Cour Victor Buck, Luxembourg
1997



**BANQUE ET CAISSE D'ÉPARGNE DE L'ÉTAT
LUXEMBOURG**



Photo: Marcel Schroeder



Avant-propos

En octobre 1995, la section des sciences naturelles, physiques et mathématiques de l'Institut grand-ducal du Luxembourg a commémoré le cent cinquantième anniversaire de la naissance de Gabriel Lippmann (1845-1921) par une exposition et une séance académique au Centre universitaire de Luxembourg. A la suite de cette célébration, nous sommes heureux de pouvoir éditer cette brochure consacrée au plus illustre savant originaire du Luxembourg.

Nous adressons nos plus vifs remerciements à Madame Erna Henicot - Schoepges, ministre de l'Education nationale et de la Formation professionnelle du Grand-duché de Luxembourg, qui avait accordé son patronage à la commémoration au cours de l'année où la capitale du Luxembourg faisait fonction de "Ville européenne de la Culture".

Nous disons notre gratitude aux responsables des institutions ayant collaboré à ces journées. Nous remercions

Monsieur Etienne Guyon, directeur de l'Ecole normale supérieure de Paris,

Monsieur Michel Demazure, directeur du Palais de la découverte de Paris,

Monsieur Pierre Jacquot, de l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne,

Monsieur Daniel Girardin, conservateur adjoint du musée de l'Elysée de Lausanne,

Monsieur Jul Christophory, directeur de la Bibliothèque nationale du Luxembourg,

ainsi que la Société française de physique.

Un merci spécial aussi à Monsieur Jean-Marc Fournier qui avait bien voulu mettre des objets de sa collection personnelle à la disposition de l'exposition Lippmann.

Nous voulons rendre un hommage tout particulier au regretté Alain Baumann, chargé de mission à l'Ecole normale supérieure de

Paris qui, avec un courage exemplaire, avait mis tout son cœur dans la préparation de l'exposition.

Nous exprimons notre profonde gratitude aux mécènes qui ont permis l'édition de cette brochure :

le Fonds culturel luxembourgeois,
la Ville de Luxembourg
ainsi que
la Banque et Caisse d'Épargne du Luxembourg,
le Crédit européen de Luxembourg.

Gabriel Lippmann naît en 1845 à Bonnevoie, qui fait alors partie de la commune de Hollerich, non encore rattachée à Luxembourg. Quand il est âgé de sept ans, après le départ avec sa famille à Paris, Bonnevoie reçoit sa première école primaire. Elle coûte 5341 francs et 69 centimes. Pourquoi ne pas, cent cinquante ans plus tard, régler une petite dette, transformer le nom du *Centre universitaire de Luxembourg* en *Centre universitaire Gabriel Lippmann de Luxembourg* ? En attendant, on peut souscrire à une suggestion avancée par plusieurs personnes : Conférer à un lycée géographiquement proche qui s'appelle *Lycée de garçons de Luxembourg*, et qui est une école mixte, un nouveau nom qui serait toujours en accord avec son sigle LGL.

Toujours est-il que les clichés qui nous avaient été prêtés par le musée de l'Élysée de Lausanne, l'École polytechnique fédérale de Lausanne, le Palais de la découverte de Paris, l'École normale supérieure de Paris, constituent des preuves inaltérables du génie inventif de Lippmann. En conclusion à cette commémoration, formulons le souhait que le message de Lippmann qui n'est pas exclusivement scientifique, mais culturel, tout le message de Lippmann puisse se perpétuer à Luxembourg même par une marque indélébile.

Jean-Paul Pier

Repères

16 août 1845 Naissance de Gabriel Lippmann à Bonnevoie, commune de Hollerich, de parents français

1858 Entrée au Lycée Napoléon (aujourd'hui Henri IV) de Paris

1868 Entrée à l'École normale supérieure de Paris

1872-74 Travaux de recherche à l'Université de Heidelberg ; docteur en philosophie

1874-75 Séjour à Berlin

1875 Thèse de doctorat sur l'électrocapillarité à Paris: *Relations entre les phénomènes électriques et capillaires* (Découverte d'une loi)

1878 Nomination de maître de conférences de physique

1883 Nomination à la chaire de Calcul des probabilités et de Physique mathématique à la Sorbonne

1886 Election comme membre de l'Académie des sciences de Paris/
Nominations comme directeur du laboratoire de recherches en physique et comme professeur de physique à la Faculté des sciences de Paris

2/2/1891 Présentation du procédé interférentiel de la photographie en couleurs à l'Académie (Application d'une théorie) : En enregistrant les ondes stationnaires obtenues dans une émulsion à grain fin, par réflexion sur un miroir, on obtient après développement un filtre qui, éclairé en lumière blanche, restitue les mêmes radiations que celles qui étaient présentes à l'enregistrement

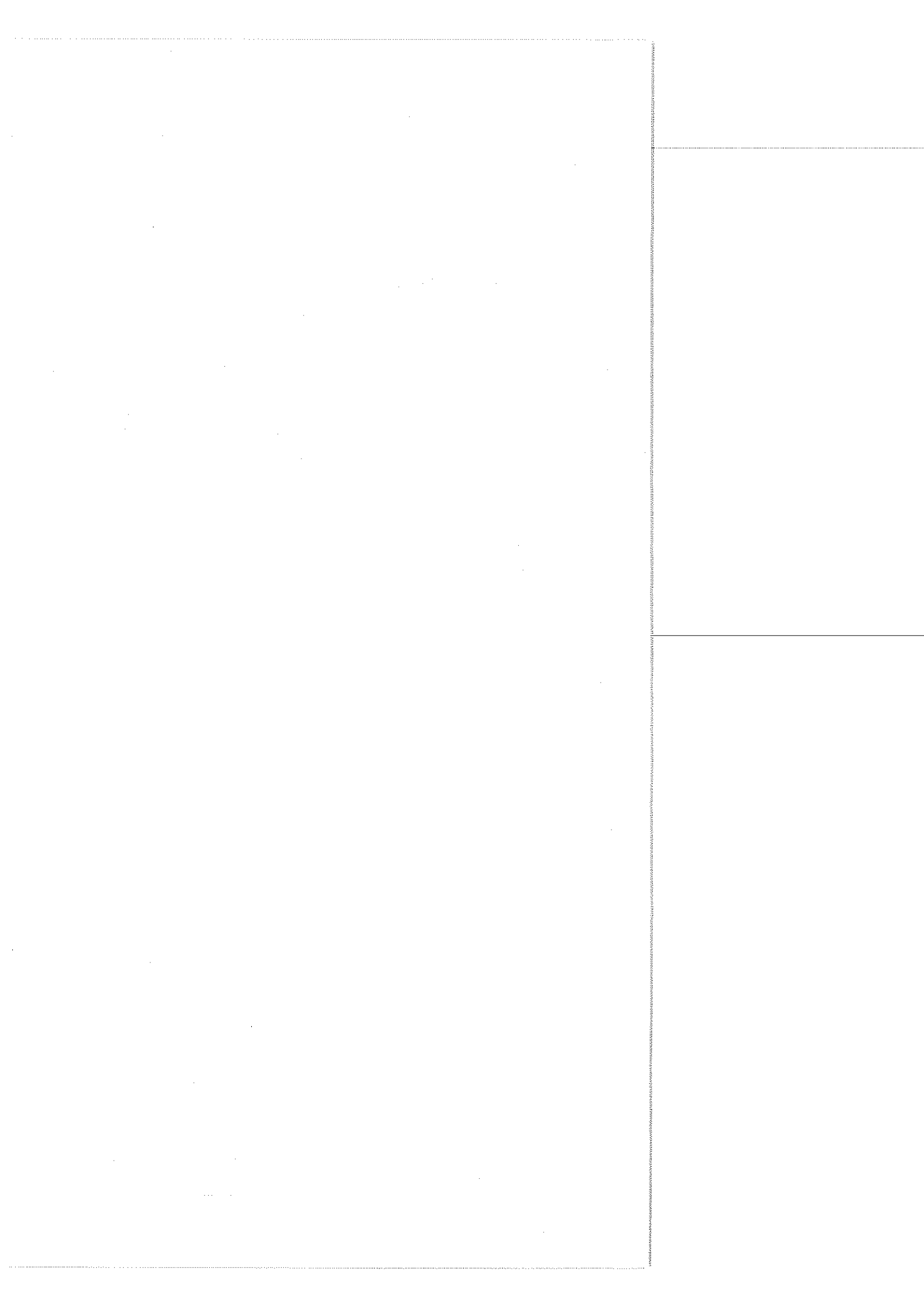
15/1/1894 Présentation des notes expliquant la théorie du procédé

1908 Attribution du Prix Nobel de physique

13 juillet 1921 Décès de Gabriel Lippmann rentrant du Canada sur le paquepot France

La référence la plus complète sur Gabriel Lippmann est

Ernest Lebon. Gabriel Lippmann. Biographie, bibliographie analytique des écrits. Collection *Savants du jour*. Gauthier-Villars, Paris, 1911.



Gabriel Lippmann

1845-1921

Jacques Bintz

président de la section des sciences naturelles, physiques
et mathématiques de l'Institut grand-ducal de Luxembourg

Qui était Gabriel Lippmann ?

Le savant Gabriel Lippmann, de descendance juive, vit le jour à Bonnevoie le 16 août 1845. Le Petit Larousse Illustré le fait naître à Hollerich ce qui n'est guère apprécié par les autochtones de Hollerich. En effet, les gens de Bonnevoie tiennent à voir en ce grand savant un des leurs, même s'il n'a vécu parmi eux que l'espace de trois ans. Toutefois ils se rendent compte que c'est en France qu'il a fait ses nombreux exploits et découvertes scientifiques et que c'est en France qu'il a fait son entrée au Panthéon des éminences scientifiques. En l'absence d'autres Luxembourgeois détenteurs du Prix Nobel, ils sont fiers d'avoir au moins hébergé le berceau d'un de ces grands savants et le Luxembourg partage leur fierté.

La famille Lippmann s'installa à Luxembourg en 1807. Le grand-père de Gabriel, dont le prénom était Jonas, est enregistré comme "maître d'école de l'idiome hébraïque", profession dont on peut se demander si elle nourrissait l'homme. Probablement pas, car en 1821 il annonçait au "Luxemburger Wochenblatt" qu'il avait ouvert au 192 de la rue Philippe II une fabrique de gants en peau "de façon de Grenoble et de Paris". Son fils Isaïe, le futur père de Gabriel, né à Ennery près de Metz en 1804, avait à ce moment 17 ans.

La tannerie et fabrique de gants s'installa à Bonnevoie en 1836. Isaïe qui tenait maintenant les rênes de l'entreprise familiale implanta son industrie dans un complexe de l'ancien couvent de Bonnevoie. D'un second mariage avec la dame Miriam Rose Lévy naquit, nous venons de le dire, le 16 août 1845 un fils auquel les parents donnaient les prénoms Jonas, Ferdinand, Gabriel. Seulement trois ans plus tard Isaïe quitta le Luxembourg pour s'établir en France.

Selon le biographe Ernest Lebon, le père de Gabriel aurait transposé son industrie de tannage à Paris afin que son fils puisse recevoir son éducation dans la ville lumière. Si c'est vrai, on peut conclure que la confiance du père dans nos capacités culturelles et éducatrices n'aurait pas été la meilleure.

Selon le même biographe Gabriel aurait fait ses études élémentaires sous la direction de sa mère; en d'autres termes il n'aurait pas fréquenté l'école primaire publique. Toujours est-il qu'en 1858 il entra au lycée Napoléon de Paris, aujourd'hui lycée Henri IV. Ici il aurait été un élève "distract, rêveur en même temps que réfléchi". Il n'avait pas seulement un intérêt très prononcé pour les mathématiques, mais il se distinguait également en français et en allemand, sans oublier son goût pour l'histoire.

Quoique Gabriel Lippmann ait quitté son pays natal à l'âge de trois ans, il ne l'a pas oublié. Citons à cet effet un texte de René Grégorius : "Ainsi pendant la guerre de 1914/18, nous trouvons Gabriel Lippmann, professeur à la Sorbonne, avec Edouard Herriot, député et maire de Lyon, Théophile Funck-Brentano, bibliothécaire à l'Arsenal et d'autres Français et Luxembourgeois au Comité de patronage du Comité franco-luxembourgeois composé de Luxembourgeois réfugiés ou combattant en France et de Français amis du Luxembourg. Un des buts du comité a été de préparer pour l'après-guerre le rapprochement intellectuel, économique et politique des deux pays".

Il est aussi fort probable que Gabriel se rendait de temps en temps à Luxembourg pour visiter son oncle Léon Lippmann, né à Luxembourg en 1808, mort à Amsterdam en 1883 où il était consul-général du Luxembourg. Il était directeur de plusieurs compagnies néerlandaises de chemin de fer et fondateur de la banque Lippmann-Rosenthal à Amsterdam. Sa profession le tenait souvent éloigné de Luxembourg, mais il fit don à sa ville natale d'une importante collection de tableaux.

Sa tante Nanette Lippmann, épouse de Samuel Nathan, était restée à Luxembourg où elle est morte en 1876.

Gabriel Lippmann est mort le 13 juillet 1921 à bord du paquebot transatlantique "France" en rentrant d'un voyage au Canada.

Aperçu sur l'œuvre scientifique de Gabriel Lippmann

L'œuvre scientifique de Gabriel Lippmann qui commence en 1868, avec son entrée à l'École normale supérieure à l'âge de 23 ans, est tellement riche qu'il sera impossible de l'évoquer dans ses détails; ainsi je me bornerai à esquisser seulement les grandes étapes.

C'est probablement en cette année qu'il alla trouver Ruhmkorff pour lui suggérer la construction d'une bobine d'induction avec circuit inducteur magnétique fermé et d'établir une résonance entre le circuit

inducteur et le circuit induit. Toutefois le célèbre physicien dédaigna de suivre les idées de son jeune confrère. Lippmann qui était un homme modeste mais peu conventionnel, refusait de suivre les études qui mènent à l'agrégation et il échoua au concours de l'agrégation. Mais en 1872 et 1874 il fut envoyé en mission en Allemagne par le gouvernement français pour lui permettre de continuer ses travaux sur l'électricité. C'est à l'université de Heidelberg qu'il tâta à la physiologie avec Kuhne, à la théorie des fonctions avec Koenigsberger, à la chimie avec Lossen, mais c'est sous l'influence de Kirchhoff, le célèbre inventeur de l'analyse spectrale, que son goût pour la physique devenait de plus en plus prononcé. C'est à l'université de Heidelberg qu'il passa en 1874 son examen de docteur en philosophie avec "summa cum laude".

Après un bref séjour à Berlin, dans le laboratoire de Helmholtz, il continuait à partir de 1875, d'abord à l'École normale, ensuite à la Sorbonne, ses expériences sur l'électrocapillarité. C'est le 24 juillet 1875 qu'il soutint à la Sorbonne sa thèse originale sur les relations, jusque-là inconnues, entre les phénomènes électriques et les phénomènes capillaires. Lippmann constata que les phénomènes électrocapillaires sont réversibles, c'est-à-dire, si l'électricité produit une variation de la surface mercurielle, inversement une variation de l'aire de cette surface produit une force électromotrice.

Dans le domaine de l'électricité, citons encore ses recherches sur le principe de la conservation de l'électricité, sur de nouvelles méthodes pour la détermination de l'ohm, l'invention de l'électromètre capillaire, ainsi que celle du galvanomètre et du dynamomètre à mercure.

En raison de ses remarquables recherches dans le domaine de l'électricité, il fut élu membre de l'Académie des sciences dès le 8 février 1886 et l'année après il occupa le fauteuil de la présidence.

Mais Lippmann ne limitait pas ses recherches physiques au domaine de l'électricité. En sa qualité de membre de la commission académique des tremblements de terre, il s'occupait de la théorie des appareils sismographiques. En 1890 il exposa par le calcul, la théorie du sismographe à charnière et en 1904 il publia deux notes, l'une relative à la mesure de la vitesse de propagation des ondes des tremblements de terre, et l'autre sur le mode d'inscription des mouvements sismiques. En 1909 il fit connaître un appareil pour enregistrer l'accélération absolue des mouvements sismiques et en 1910 un sismographe à colonne liquide.

Au début du siècle, entre 1901 et 1908, Lippmann suggéra la construction de plusieurs instruments trouvant leur application en astronomie et en photographie.

Si c'est avec la découverte de l'électrocapillarité que Lippmann a fait parler de lui dans le monde scientifique international, la découverte

qui l'honore le plus et qui lui a valu une réputation mondiale, c'est celle de la photographie des couleurs par la méthode interférentielle. Si la première est surtout la découverte d'une loi, la seconde est l'application générale d'une théorie.

Dès 1886 Lippmann avait entrevu la possibilité de fixer les couleurs du spectre solaire sur la plaque photographique. En 1887 et 1891 il trouva la couche sensible, transparente et sans grains qui lui permettra de réaliser l'expérience imaginée.

Le 2 février 1891 il fit connaître à l'Académie des sciences sa découverte par les mots : "Je me suis proposé d'obtenir sur une plaque photographique l'image du spectre avec ses couleurs, de telle sorte que cette image demeurât désormais fixée et pût rester indéfiniment au grand jour sans s'altérer".

En perfectionnant l'isochromatisme des plaques, il réussit en 1892 à reproduire les couleurs composées d'objets naturels. A la séance de l'Académie du 25 avril 1892 il disait : "Les quatre clichés que j'ai l'honneur de soumettre à l'Académie, représentent fidèlement des objets assez divers : un vitrail en quatre couleurs, rouge, vert, bleu, jaune, un groupe de drapeaux, un plat d'oranges surmontées d'un pavot rouge, un perroquet multicolore. Ils montrent que le modèle est rendu en même temps que les couleurs".

Par la suite il travaillait à l'amélioration des émulsions afin de pouvoir diminuer le temps de pose pour rendre ainsi pratique la photographie des couleurs.

Dans deux notes, la première datée du 15 janvier 1894 et la deuxième du 30 juillet 1906, Lippmann exposait à l'Académie des sciences la théorie de la photographie des couleurs par la méthode interférentielle.

Tandis que l'industrie française se désintéressait de la photographie interférentielle, il n'en a pas été de même de l'industrie allemande. La firme Carl Zeiss de Jena s'en occupait activement et la firme R. Jahr de Dresde fabriqua les plaques nécessaires.

Le 10 décembre 1908 l'Académie des sciences de Suède attribua à Gabriel Lippmann la plus haute distinction qu'un physicien puisse désirer, le prix Nobel de physique. A cette occasion le professeur Hasselberg, président de l'Académie retraça l'œuvre de Lippmann par les paroles suivantes :

"Monsieur le professeur, dans ce que je viens de dire j'ai tenté de donner les traits principaux d'un travail qui, parmi les nombreuses et belles recherches dont vous avez si souvent enrichi la science, a dû en premier lieu déterminer notre Académie à vous décerner le prix Nobel de Physique cette année.

Inutile de dire que ce travail, bien connu de tout le monde, est votre splendide découverte de la photographie des couleurs, découverte

par laquelle vous avez donné non seulement un développement extrêmement précieux à l'art photographique, mais encore une illustration des lois générales de l'optique physique d'une élégance extraordinaire. Comme la photographie elle-même, ce grand problème de la fixation des couleurs est d'origine française; mais ce que, pendant de longues années de travail assidu, n'ont pu obtenir ni Edmond Becquerel lui-même, ni ses successeurs dans tous les pays, vous l'avez réalisé d'une manière qui, à juste titre, doit être considérée comme essentiellement définitive. Agréez donc monsieur le professeur, nos félicitations les plus sincères pour ce grand succès de vos travaux scientifiques, travaux par lesquels vous avez si puissamment contribué au progrès intellectuel de l'humanité et à la gloire scientifique de votre belle patrie".

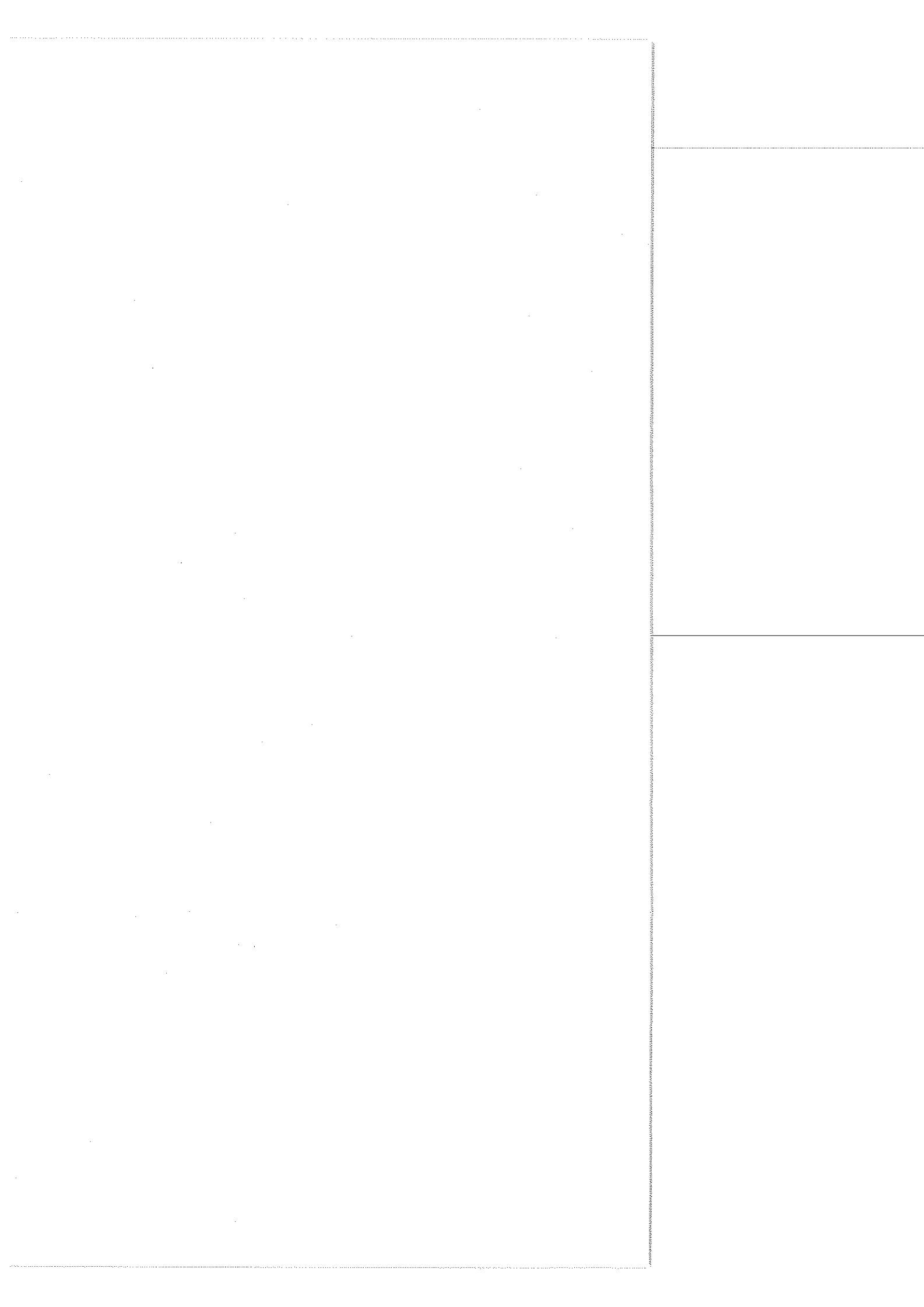
Bibliographie succincte

Bintz Jacques, L'œuvre scientifique de Gabriel Lippmann in "Inauguration d'une plaque à la mémoire de Gabriel Lippmann par le Centre culturel et d'Education populaire de Bonnevoie et la Section des sciences de l'Institut grand-ducal". Bonnevoie 1984.

Grégorius René, Notice biographique in idem.

d'Huart Emile, La photographie des couleurs; extrait des archives trimestrielles de l'Institut grand-ducal, Section des sciences, année 1906, fascicules I et II.

Lebon Ernest, Gabriel Lippmann, biographie, bibliographie analytiques des écrits, Gauthier-Villars, Paris 1911.



Commémoration du 150ème anniversaire de Gabriel Lippmann

Etienne Guyon

directeur de l'Ecole normale supérieure, Paris

Lorsque le professeur J.-P. Pier m'a demandé d'apporter une contribution au fascicule en hommage à Gabriel Lippmann, je n'ai pas hésité. Je n'avais pourtant pas participé aux journées à Luxembourg autour de sa mémoire, mais j'y avais été associé indirectement dans sa préparation par l'intermédiaire d'un collègue et ami, Alain Baumann. Ce dernier ayant disparu peu après, à la suite d'une longue maladie, c'est aussi, comme me l'a demandé J.-P. Pier, en amical hommage à la mémoire d'Alain que je le fais.

J'avais eu l'occasion de venir un peu plus tôt à Luxembourg dans le cadre des manifestations internationales qui accompagnaient le bicentenaire de l'Ecole normale supérieure, et j'avais appris, à cette occasion, la préparation de manifestations autour de Gabriel Lippmann, ancien élève de la "rue d'Ulm". Je savais par ailleurs que le Palais de la Découverte de Paris, dont j'avais assuré la direction quelques années plus tôt, avait mis en place et présenté des éléments d'exposition autour des recherches de Lippmann¹. Il était, pour ces deux raisons,

¹Photographier les couleurs, implique de savoir les distinguer pour les enregistrer. Deux méthodes le permettent. L'une repose pour les séparer sur l'usage de filtres, généralement trois, ponctuels ou non, incorporés à l'émulsion photographique ainsi que l'avait, par exemple, imaginé Louis Lumière avec ses grains d'amidon colorés. L'autre consiste à la reconnaître directement par leurs longueurs d'onde; c'est ainsi que les ailes de certains papillons sélectionnent les couleurs qu'elles nous renvoient, ou que depuis quelques décennies ont été créés les filtres interférentiels. Le génie de Gabriel Lippmann a été d'imaginer une solution de ce type, tout à fait originale en son temps, que seul pouvait concevoir un esprit préparé par une profonde connaissance de l'optique physique : enregistrer les couleurs, longueur d'onde par longueur d'onde, dans l'épaisseur d'une émulsion, grâce à leurs interférences. Et, inversement les restituer par "filtrage" d'une lumière blanche réfléchie par ce même support. Peut-on rêver plus de fidélité ! Deux inconvénients cependant : l'épreuve papier est exclue, l'équipement de projection

normal que je sois intéressé par cet anniversaire. Je me suis adressé naturellement à Alain Baumann, un très proche collaborateur qui, après avoir été longtemps ingénieur de recherche au "Palais" avait choisi de me suivre à "l'Ecole" comme adjoint direct. Alain qui avait une formation de physicien cristallographe a accepté avec enthousiasme de s'associer à ce projet avec nos collègues luxembourgeois. C'est donc à travers lui que j'ai vécu cet anniversaire et je sais combien, alors qu'il vivait avec courage sa maladie, il a été heureux de cette expérience et de cette rencontre.

L'Ecole normale supérieure a célébré le 200ème anniversaire de sa création par la convention républicaine de la Révolution Française (brumaire de l'an III) à l'automne 1994. Le décret fondateur en dit bien l'ambitieux projet "*Il sera établi à Paris une Ecole Normale où seront appelés de toutes les parties de la République des citoyens déjà instruits dans les sciences utiles pour apprendre, sous les professeurs les plus habiles dans tous les genres, l'art d'enseigner*". Il s'agissait alors de rassembler 1000 à 1500 élèves venus de toute la France pour leur communiquer en quelques mois l'ensemble des connaissances qu'ils pourraient à leur tour diffuser à travers des écoles centrales, créant ainsi un corps enseignant pour l'ensemble de la nation. Les maîtres étaient remarquables : Laplace, Lagrange, Monge en mathématiques, Berthollet en chimie, Vandermonde en économie ... Leurs cours, qui sont réédités actuellement² sont souvent des bijoux. Mais pour un public hétérogène rassemblé dans des conditions précaires à Paris par un des plus durs hivers du siècle l'expérience ne pouvait que conduire à un échec. Ce fut le cas. L'Ecole fut fermée quelques mois plus tard et jusqu'en 1808 où Napoléon la recréa avec l'Université Impériale. Napoléon ouvrit une autre Ecole normale supérieure à Pise. La scuola

onéreux est de réglage délicat. La méthode de Lippmann est cependant un remarquable exemple d'illustration des phénomènes interférentiels, particulièrement bienvenu au Palais de la Découverte où un public admiratif s'étonnait, devant la projection d'une grande image du parc de Saint Cloud, de sa qualité et de son ancienneté. Je remercie C. Penel, qui était sous-directeur du Palais de la Découverte lorsque l'exposition Lippmann y a été réalisée.

C'est, Alain Baumann, docteur en géologie et passionné par tous les phénomènes optiques si utiles dans la reconnaissance des minéraux, qui, avec son équipe du laboratoire de physique du palais de la Découverte, avait ce domaine en charge. Il rechercha de nouvelles solutions techniques et réalisa un dispositif de projection remplaçant en particulier la source à arc, instable et dangereuse, par une source lumineuse plus actuelle. La difficulté était d'assurer une fidèle restitution des couleurs et pour cela, mis à part le dispositif optique, d'approcher au mieux du spectre de la lumière naturelle, le résultat était excellent.

²Les cours de l'an III sont édités chez Dunod. Volume I cours de mathématiques – Laplace, Lagrange et Monge.

Volume II

Le Volume III cours de Haüy (physique), Berthollet (chimie), Daubenton (sciences naturelles) sont en cours d'édition.

normale supérieure reste un grand établissement singulier en Italie dont en particulier sont issus les prix Nobel Enrico Fermi et Carlo Rubbia. Trois autres Ecoles normales supérieures seront créées depuis en France, qui entretiennent entre elles des relations scientifiques et pédagogiques fortes. Notre collègue Jean-Pierre Hansen a dirigé depuis sa création le département de physique de la plus jeune, celle de Lyon.

L'échec de ce qui était, en fait, le dernier essai d'un savoir encyclopédique du siècle des lumières portait en germe cependant les éléments de l'École normale qui ont connus Gabriel Lippmann qui y "intégra" en octobre 1868 et les étudiants luxembourgeois qui en furent des auditeurs années après années dans cette période. Les étudiants étrangers de l'École normale supérieure furent d'ailleurs appelés longtemps les "zus" en référence au premier étudiant luxembourgeois qui y fut accueilli et qui avait un léger défaut d'élocution – disons "un chat sur la langue"). Cette tradition internationale de l'École normale supérieure, des E.N.S. devrais-je dire, se trouve renforcée par le fait que – acte unique de l'Europe impose – les étudiants européens reçus aux concours sont accueillis maintenant comme fonctionnaires stagiaires au même titre que leurs camarades français. Nous avons "à la rue d'Ulm" mis en place des concours spéciaux qui permettent aux étudiants d'université dont le dossier est retenu d'être sélectionnés par un oral sur leurs spécialités en lettres et en sciences³.

Mais revenons à l'esprit de l'École normale qu'a connu Gabriel Lippmann et que connaissent encore les élèves et les auditeurs qui y travaillent.

Si l'encyclopédisme n'est plus possible, l'association des sciences et des lettres à l'intérieur d'un même collège et le partage entre élèves que permet la vie en commun dans un collège semblable aux collèges d'"Oxbridge" forment la base d'un "savoir vivant"⁴.

A côté du savoir pointu et en profondeur auquel conduit inévitablement la formation par la recherche, la curiosité peut être satisfaite hors de son champ de compétence par le contact avec des élèves ayant des cursus différents. Une formation générale classique est, à coup sûr, un préalable fort utile. Nous savons que Gabriel Lippmann a excellé dans une formation littéraire en français, allemand, philosophie. Il eut au concours d'entrée sciences qu'il choisit après des hésitations un 20 à sa version latine ! Cette culture classique l'accompagna au long de

³Les informations concernant le 3ème concours Sciences (G/S) et Lettres (B/L) et plus généralement celles de l'ensemble des concours d'entrée peuvent être obtenues auprès du Service des Concours – E.N.S. – 48, boulevard Jourdan – 75014 Paris.

⁴"L'apprentissage du savoir vivant" est le titre de l'ouvrage publié aux P.U.F. sous la direction de Paul Vialaneix – Bilan d'un colloque entre responsables de grands collèges à l'occasion du Bicentenaire de l'École normale supérieure.

sa vie⁵.

Le savoir vivant c'est aussi celui qui s'acquiert à partir du désir et de la curiosité plus que par des cours imposés (tranchant en cela avec l'initiative de la convention). Jean Jaurès "cacique" de la promotion 1878 ne disait-il pas : *"On ne peut introduire ici un seul enseignement qui n'ait été devancé par une curiosité. C'est que l'esprit est éveillé et sollicité en tous sens, non seulement par les maîtres mais aussi et surtout par les camarades"*.

Nous savons cette indépendance de jugement, cette curiosité, cet amour de l'initiative individuelle qui a guidé la recherche de Lippmann. Ce sont bien sûr les qualités qui se développent auprès des maîtres – "les maîtres les plus illustres" du décret de création de l'Ecole normale – non sur les bancs de la classe mais plutôt au contact dans le laboratoire. Ce fut le cas pour Lippmann avec son maître, le physicien Kirchoff entre autres. Le littéraire Jaurès se formera de même dans la bibliothèque de l'Ecole normale – le laboratoire des littéraires – auprès de Lucien Herr qui fut le maître à penser de nombreux intellectuels engagés au début de ce siècle (Jaurès, Péguy, Blum, ...).

Enfin le décret de la Convention nous parle de *"l'art d'enseigner"*. Clairement la Didactique avec un D majuscule a montré son incapacité à former des enseignants à partir des méthodes générales. C'est au contact direct des disciplines scientifiques et par une formation concrète et contrôlée que se forme un maître. Nous ne sommes pas bien loin de la formation "sur le tas" pour et à la recherche. Il n'en reste pas moins que nous reconnaissons toujours aujourd'hui comme la mission première de l'Ecole normale de former les maîtres de l'enseignement supérieur et de la recherche. Et là encore les témoignages que nous avons de G. Lippmann nous décrivent le professeur *"aux qualités de simplicité et de clarté qui caractérisaient ses mémoires ... et où était éliminé ... systématiquement tout ce qu'il jugeait n'être pas absolument nécessaire pour la compréhension des idées générales" ...*. C'est bien cela la méthode de la recherche appliquée à la mission de formation.

Et puisque j'ai évoqué en début de ce texte la présence d'expériences de Lippmann au palais de la Découverte qu'a utilisées Alain Baumann, je voudrais terminer en évoquant la mémoire d'un autre normalien physicien et qui reçut le prix Nobel tout comme Lippmann, Jean Perrin. Jean Perrin créa en effet le Palais de la Découverte. Il le fit dans le même temps – dans le même élan du front populaire en France – qu'il créa le Centre National de la Recherche Scientifique.

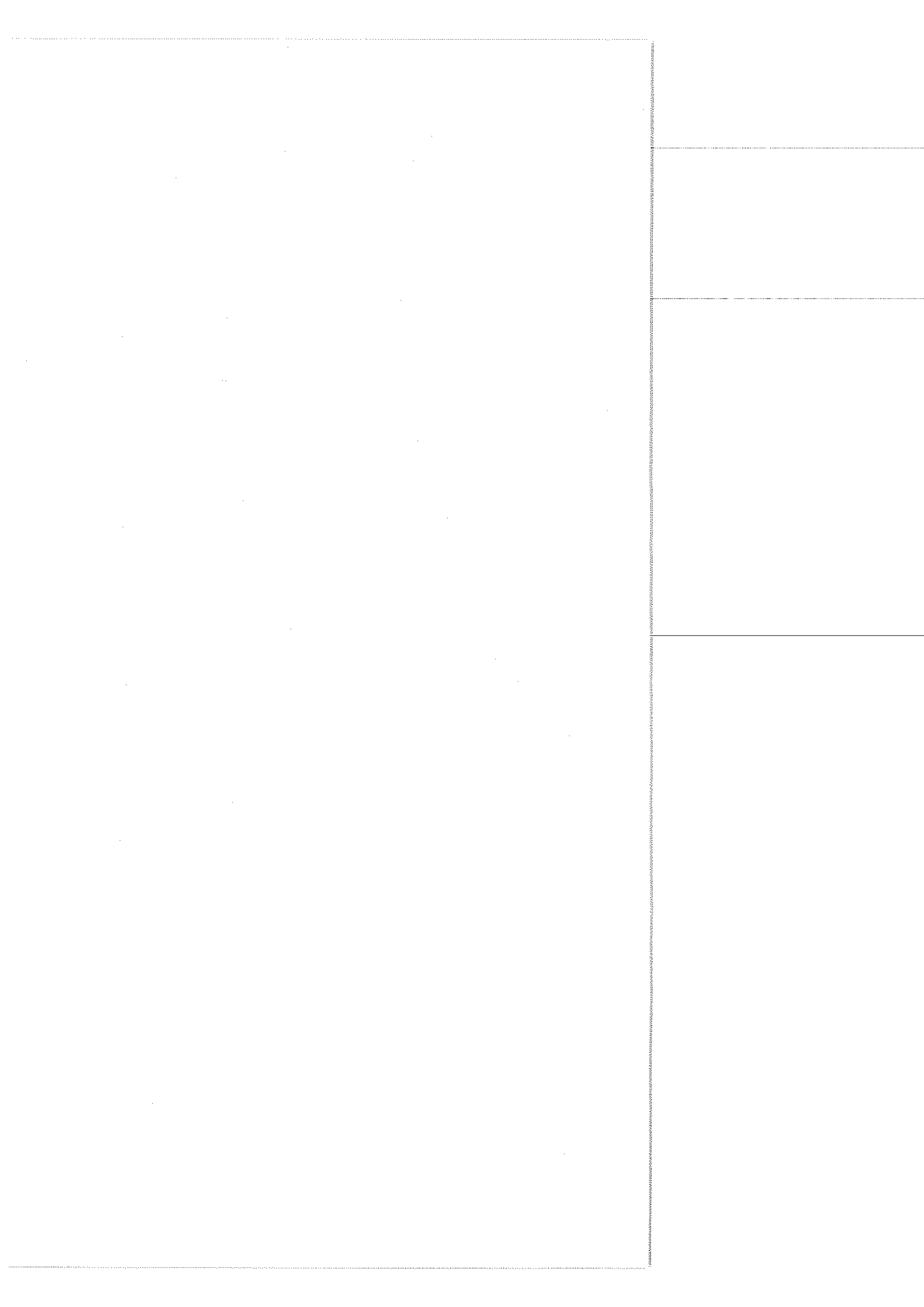
"Il serait déraisonnable de ne pas faire de place dans cette Exposition aux activités qui ont été précisément la source des Inventions,

⁵J'ai obtenu des informations sur G. Lippmann en particulier avec la notice écrite par Appell dans l'annuaire des anciens élèves de l'E.N.S. (année 1923).

puis des Techniques, c'est-à-dire à la Recherche scientifique et à la Découverte. Le Palais de la Découverte doit rendre manifeste cette origine et faire comprendre au public que, dans l'avenir comme dans le passé, la Recherche scientifique et la Découverte sont la condition indispensable de tous les progrès humains" (J. Perrin).

Il considérait en effet nécessaire d'associer à l'acte unique de la création scientifique qui est accessible à un petit nombre, l'acte répété de la présentation qui peut être fait dans un musée de Sciences par une présentation avec des animateurs ou, lorsque l'expérience s'y prête, en "libre service". Cette innovation d'un musée d'idées, de création scientifique – d'un musée où l'on touche – s'est largement développé depuis. L'Exploratorium de San Francisco que dirige le normalien Coery Delacote en est aujourd'hui un très remarquable exemple.

C'est dans ce cadre et cet esprit qu'ont été présentées au Palais de la Découverte les expériences d'optique de Lippmann et qu'elles ont accompagné les journées commémoratives au Luxembourg, initiative que n'auraient reniée ni Jean Perrin ni Gabriel Lippmann.



Gabriel Lippmann, physicien et inventeur à la charnière de deux époques

Jean-Pierre Hansen
Professeur à l'École normale supérieure de Lyon
et à l'Institut universitaire de France

1. La physique à la fin du 19^e siècle : état des lieux

Avant d'évoquer quelques-unes des contributions scientifiques marquantes de Gabriel Lippmann, il ne semble pas inutile d'évoquer le contexte scientifique, et notamment l'état des connaissances en physique, pendant le dernier quart du 19^e siècle, période dans laquelle s'inscrivent les recherches et découvertes les plus importantes du physicien Lippmann. Cette période correspond à l'épanouissement, voire au triomphe apparemment définitif de la physique "classique" de nature essentiellement macroscopique et phénoménologique; depuis Isaac Newton, les lois de la nature, telles qu'elles découlent de l'observation et de l'expérimentation, sont formulées dans un langage mathématique déterministe en termes d'équations différentielles ou d'équations aux dérivées partielles. Les trois piliers de la physique classique sont la mécanique, l'électromagnétisme et la thermodynamique.

La **Mécanique** a atteint vers 1860, un degré de perfection formelle d'une rare élégance, avec les travaux des mathématiciens Louis de Lagrange (1736-1813), William Rowan Hamilton (1805-1865) et Joseph Liouville (1809-1882). Le triomphe de cette discipline est illustré de façon éclatante par la découverte de la planète Neptune en 1846, fondée sur les calculs des astronomes John Couch Adams et Urbain Le Verrier, qui avaient prédit la position de la planète d'après les perturbations observées de la trajectoire d'Uranus.

L'**électromagnétisme** vient de trouver une expression mathématique concise et définitive dans les célèbres équations de James Clerk Maxwell (1831-1879), proposées à Cambridge en 1873, suite aux

contribution de Jean-Marc Fournier. Il faut noter que cette application astucieuse du phénomène d'interférences de l'optique ondulatoire, qui permet, en principe, la reproduction parfaitement fidèle des couleurs, n'atteindra jamais le stade proprement industriel, malgré l'intérêt manifesté par les frères Lumière à Lyon. La méthode interférentielle sera rapidement supplantée par la méthode de synthèse à partir des trois couleurs primaires, proposée dès 1862 par l'inventeur français Louis Ducos du Hauron.

Avant d'examiner brièvement le phénomène d'électrocapillarité, il faut souligner deux aspects du mode de travail de Lippmann. D'abord Lippmann a toujours eu le souci de proposer une formulation théorique rigoureuse de ses observations expérimentales, en utilisant avec beaucoup de compétence tous les outils de la physique "classique" de son époque, notamment l'optique et la thermodynamique. Ensuite Lippmann travaille seul, ce qui n'est pas exceptionnel pour son époque, mais ce mode de travail changera profondément au 20^e siècle, surtout en physique expérimentale.

4. Lippmann et les lois de l'électrocapillarité

La "capillarité" est une notion générique qui englobe tous les phénomènes physiques ou physico-chimiques observés à la surface d'un liquide ou à l'interface séparant deux milieux matériels, par exemple deux liquides non miscibles (comme l'eau et l'huile), un liquide et sa vapeur, ou un liquide qui s'étale sur une surface solide [4]. La capillarité est à l'origine de la montée de la sève dans les plantes, de la formation de bulles de champagne ou de l'action des détergents. C'est une branche très ancienne de la physique, qui est restée étonnamment jeune, avec les découvertes récentes sur les phénomènes de mouillage, ou de l'exploration de films liquides ultraminces, grâce à l'utilisation de "machines à force de surface", capables de contrôler l'épaisseur de films liquides avec une résolution d'une fraction de nanomètre (un milliardième de mètre !). Deux lois fondamentales régissent les phénomènes capillaires :

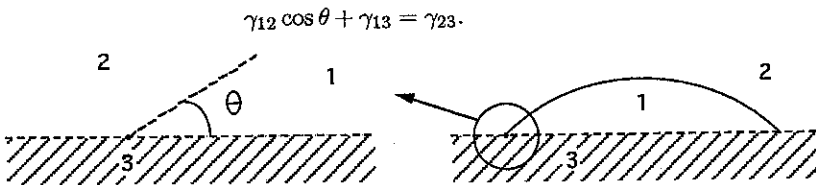
- La loi de Pierre Simon de Laplace (1749-1827), qui exprime que la différence de pression (ou surpression) entre deux milieux fluides (1 et 2), séparés par une surface courbe, est proportionnelle à la somme des rayons de courbure principaux R et R' de la surface de séparation :

$$\Delta P = P_1 - P_2 = \gamma(1/R + 1/R').$$

Le coefficient de proportionnalité γ est la tension superficielle, qui a la dimension d'une force par unité de longueur;

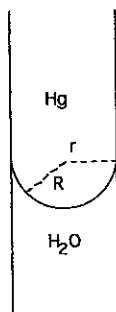
- La loi de Thomas Young (1773-1829) concerne le mouillage d'un substrat solide par une goutte liquide. On est en présence de trois milieux (1 pour le liquide; 2 pour la vapeur ou le gaz de l'atmosphère;

3 pour le substrat solide). Si $\gamma_{\alpha\beta}$ désigne la tension superficielle entre les milieux α et β (où les indices α et β peuvent prendre les valeurs 1, 2 ou 3), les trois tensions sont reliées à l'angle θ que fait la goutte avec le substrat par la relation :



Comme $\cos \theta$ ne peut dépasser 1, on observe le mouillage complet du substrat (lorsque le liquide s'étale complètement sur le solide), quand $\gamma_{12} > \gamma_{23} - \gamma_{13}$.

En guise d'application de ces deux lois, voyons comment on peut mesurer la tension superficielle de l'interface entre deux liquides non miscibles, par exemple le mercure et l'eau. On se sert d'un tube capillaire cylindrique vertical, de rayon r de l'ordre de quelques microns, et on observe le ménisque qui sépare la colonne d'eau dans la partie inférieure, de la colonne de mercure au-dessus. Comme le mercure ne mouille pas du tout le verre (il forme des gouttelettes sphériques sur un plan de verre horizontal), l'angle de raccordement est $\theta = \pi$ (180°) d'après la formule d'Young. Le ménisque eau-mercure est par conséquent hémisphérique, de rayon R égal à celui du capillaire ($R = r$).



L'équilibre est atteint lorsque la surpression, égale au poids de la colonne de mercure par unité de surface, est égale à la surpression donnée par la loi de Laplace. Si ρ est la densité (masse par unité de volume) du mercure et h la hauteur de la colonne de mercure, la

surpression due à la colonne vaut $\rho \cdot g \cdot h$ (où g est l'accélération de la pesanteur). En égalant à la surpression de Laplace, on trouve la relation :

$$\rho g h = 2\gamma/r$$

où γ est la tension superficielle de l'interface eau/mercure. La densité du mercure est de $13,5 \text{ gr/cm}^3$; pour un rayon du capillaire $r = 5$ microns (soit 5 millièmes de mm), on mesure une hauteur de la colonne de mercure $h \cong 1 \text{ m}$, ce qui donne une valeur de $\gamma \cong 350 \text{ dyn/cm}$.

La tension superficielle dépend de la nature des fluides en co-existence, mais aussi de paramètres physiques, comme la température. Dans sa thèse, Lippmann s'est intéressé à l'influence de l'état électrique de l'interface sur la tension superficielle. Il considère deux liquides conducteurs d'électricité, le mercure et une solution d'acide sulfurique dans l'eau. Grâce à un montage expérimental très simple, il mesure la position du ménisque qui sépare le mercure de la solution, en fonction de la différence de potentiel (d.d.p.) ΔV entre les deux liquides conducteurs. Il énonce deux lois qui résument ses observations :

Première loi : la tension superficielle (ou "constante capillaire") à la surface de séparation du mercure et de la solution d'acide sulfurique est fonction de la d.d.p. ΔV qui a lieu à cette surface :

$$\gamma = \gamma(\Delta V).$$

Deuxième loi : lorsqu'on déforme une surface liquide, ΔV varie dans un sens tel que la tension superficielle γ développée en vertu de la première loi s'oppose à la continuation du mouvement. En d'autres termes, si on tente d'augmenter l'aire de l'interface, la d.d.p. ΔV variera de façon à ce que l'augmentation correspondante de γ s'oppose à la croissance de la surface. Cette loi rappelle la loi de Lenz relative au phénomène d'induction électromagnétique. La deuxième loi est spectaculairement illustrée par l'expérience du "coeur de mercure" [5], que Lippmann avait entrevue lors de son séjour à Heidelberg.

Une analyse thermodynamique [6] permet finalement à Lippmann de relier la densité de charge σ portée par l'interface entre les deux milieux conducteurs, à la dérivée de la tension superficielle par rapport à la d.d.p. :

$$\sigma = - \left(\frac{\partial \gamma}{\partial (\Delta V)} \right)_{P,T}$$

où la dérivée partielle est prise à pression P et à température T constantes.

Lippmann ne s'est pas contenté d'établir expérimentalement et théoriquement les bases de l'électrocapillarité, mais il a proposé et réalisé dans la foulée des applications concrètes, parmi lesquelles l'électromètre capillaire, appareil de grande précision et de faible inertie, et

le moteur électrocapillaire, qui permet de transformer l'énergie d'une pile électrique en énergie mécanique, et réciproquement (réversibilité). Le principe de fonctionnement de ce moteur rappelle celui des moteurs thermiques, les grandeurs thermodynamiques γ , A (aire de l'interface), q (charge électrique à l'interface) et ΔV jouant le rôle des variables P , V (volume), S (entropie) et T dans le cycle de Carnot du moteur thermique.

5. Conclusion

Gabriel Lippmann est l'archétype du savant cultivé, inventif et rigoureux de l'époque où la physique "classique" est à son apogée. Après une période de "purgatoire", où elle était temporairement éclipsée par la révolution atomique de la première moitié du 20^e siècle, cette physique revient en force. La physique contemporaine s'intéresse de près à de nombreux phénomènes à l'échelle macroscopique, notamment en mécanique (turbulence, fracture, frottement solide, matière granulaire) et en optique (diffusion multiple et localisation de la lumière), qui n'auraient pas déplu à Lippmann. Même si son moteur électrocapillaire ou son procédé interférentiel de photographie des couleurs sont maintenant plutôt du domaine du musée des sciences, la démarche scientifique de Gabriel Lippmann pour aboutir à ces réalisations est toujours d'actualité.

Remerciements : J'aimerais remercier Elisabeth Charlaix pour son aide et ses conseils dans la préparation de mon exposé.

Références

- [1] Ernest Lebon, "Gabriel Lippmann"; Gauthier-Villars, Paris (1911).
- [2] Gabriel Lippmann, "Relations entre les phénomènes électriques et capillaires", thèse pour le grade de Docteur ès Sciences Physiques; Gauthier-Villars, Paris (1875).
- [3] Gabriel Lippmann, Comptes Rendus de l'Académie des Sciences **112**, 274 (1891).
- [4] Voir par exemple l'ouvrage classique de J.S. Rowlinson et B. Widom, "Molecular Theory of Capillarity"; Clarendon Press, Oxford (1982).
- [5] J.C. Roux et Y. Mottot, Pour la Science **46**, 128 (août 1981).

- [6] Pour une présentation moderne de l'argument de Lippmann, voir la section 25 de l'ouvrage de L.D. Landau, E.M. Lifshitz et L.P. Pitaevskii, "Electrodynamics of Continuous Media", Pergamon Press, Oxford (1984).

46, allées d'Italie
F-69000 Lyon

Refroidissement d'atomes par laser*

Robin Kaiser
Institut non linéaire de Nice

I) INTRODUCTION

Les effets mécaniques de la lumière sur la matière

Dans l'étude de l'interaction entre matière et rayonnement, le rôle des effets mécaniques est un point très important dont la compréhension fine a permis des avancées théoriques, expérimentales et appliquées majeures. En 1619, J. Kepler tentait déjà d'expliquer le phénomène d'orientation de la queue des comètes par l'action de la pression de radiation exercée par le soleil sur les particules composant la comète. À la fin du siècle dernier, en 1871, lorsque J.C. Maxwell a établi sa théorie de l'électromagnétisme, il a tenu compte explicitement des forces exercées par le rayonnement électromagnétique sur les milieux qualifiés de polarisables [1]. À la même époque, en 1883, A. Bartoli a déduit indépendamment cette même force de pression de radiation à partir d'arguments thermodynamiques [2].

Les premières mises en évidence expérimentales convaincantes de ces effets mécaniques ont été réalisées au début du siècle. En 1901 P. Lebedev [3] ainsi que E. Nichols et G. Hull [4] ont observé l'action mécanique de la lumière sur des miroirs suspendus. En 1917, A. Einstein a montré la nécessité de ces effets pour pouvoir expliquer l'état d'équilibre thermodynamique d'un ensemble d'atomes en interaction avec le rayonnement [5]. Un pas décisif fut franchi en 1933 quand R. Frisch réussit à défléchir un jet atomique de sodium au moyen d'une lampe à décharge de sodium [6], démontrant ainsi la possibilité d'utiliser l'interaction résonnante entre atomes et rayonnement pour produire une déflexion observable d'un jet. Dans les années 50, A. Kastler envisageait de combiner pompage optique

* Rédaction élaborée à partir d'une conférence faite en 1995 à Luxembourg dans le cadre de la commémoration Gabriel Lippmann

et effets mécaniques du rayonnement pour réaliser un effet "lumino-frigorifique" [7] que l'on peut voir comme un précurseur des schémas modernes du refroidissement d'atomes par laser. Mais ce n'est cependant qu'après le développement des sources lasers (années 1960-1970), qui permettent l'échange d'un très grand nombre de photons entre les atomes et le champ électromagnétique, que la manipulation d'atomes par la lumière a pu faire des progrès importants.

Dans un premier temps, l'utilisation des lasers visait essentiellement une observation et une analyse des atomes en se basant sur les résonances internes de la structure atomique (spectroscopie). Seule une expérience de déflexion d'un jet atomique, telle celle réalisée par R. Frisch, a été faite à l'aide d'une source laser par H. Walther [8]. Les premières propositions concrètes de schémas de refroidissement d'atomes neutres [9] et d'ions piégés [10] par laser datent de 1975. Depuis, ce nouveau domaine de la physique atomique a connu un développement continu. C'est ainsi qu'en 1986 le premier refroidissement d'atomes par laser dans une "mélasse optique" a été mis en évidence dans les laboratoires Bell [11] et le premier confinement spatial d'atomes dans un piège "magnéto-optique" a été réalisé au MIT en 1987 [12]. On sait maintenant ralentir, refroidir et piéger spatialement de nombreuses espèces atomiques : atomes alcalins, atomes de gaz rares métastables ou encore des atomes tels que le chrome, etc. En 1988, de nouveaux schémas subtils de refroidissement par laser ont vu le jour (effet Sisyphe [13], résonances noires [14]) qui ont à nouveau dynamisé cet axe de recherche. Actuellement, les températures que l'on arrive à obtenir sont de l'ordre du milliardième de degré Kelvin au-dessus du zéro absolu. Ceci a permis aux physiciens de clamer d'avoir su produire en laboratoire les atomes les plus froids de l'univers. Avec ces nouveaux mécanismes raffinés, le contrôle du mouvement des atomes se fait avec une précision telle que le comportement ondulatoire de la matière, prévu par la mécanique quantique, ne peut plus être ignoré, ce qui ouvre des perspectives de recherche fascinantes. C'est ainsi qu'en 1995 une expérience, longtemps considérée comme un objectif important de ce domaine de recherche, a été réalisée : la condensation de Bose-Einstein d'un gaz d'atomes [15]. La température et les densités obtenues sont telles que les atomes se condensent dans le même état quantique. Cette situation extrême permet aux physiciens d'explorer des propriétés inhabituelles de la matière et il ne fait pas de doute que d'autres développements spectaculaires des atomes froids verront prochainement le jour.

II) LE REFROIDISSEMENT D'ATOMES

1. Introduction

Dans la suite nous allons passer en revue les différents mécanismes de refroidissement et de piégeage d'atomes. Il ne s'agit pas ici de donner tous les détails théoriques ou expérimentaux (pour plus de détails on se reportera aux articles de recherche cités en référence). Nous essayerons plutôt de donner un bref aperçu des ingrédients physiques essentiels de cette manipulation par laser de la vitesse et de la position des atomes. Nous donnerons quelques ordres de grandeur pour bien situer les effets analysés et des interprétations plus imagées nous permettront de mieux comprendre les phénomènes physiques au-delà d'explications théoriques plus ou moins rigoureuses. Ces images sont d'ailleurs extrêmement utiles aux physiciens pour expliquer simplement les expériences réalisées et pour flairer de nouveaux effets intéressants.

Afin de distinguer clairement les différentes notions telles que ralentissement, refroidissement ou piégeage d'atomes, nous suivons un plan qui correspond par ailleurs à peu près bien à l'évolution historique des réalisations expérimentales. Dans la partie 2, nous donnons un ordre de grandeur des forces énormes qu'on peut exercer sur des atomes à l'aide de sources laser. Une première utilisation de ces forces, décrite dans la partie 3, est le ralentissement d'un jet atomique par laser. Dans la partie suivante nous décrivons le refroidissement Doppler, premier principe de refroidissement d'atomes par laser proposé en 1975 [9, 10]. Dans la partie 5 nous présentons un mécanisme de confinement spatial d'atomes dans un piège magnéto-optique. Les parties suivantes donnent un très bref aperçu sur les mécanismes qui sont aujourd'hui utilisés dans le refroidissement d'atomes : le refroidissement sub-Doppler (partie 6), le refroidissement sub-recul (partie 7) et puis le refroidissement évaporatif (partie 8) qui en fait n'utilise plus l'interaction atome-laser, mais qui est utilisé en combinaison avec le refroidissement d'atomes par laser pour obtenir la condensation de Bose-Einstein (partie 9).

2. Les forces en jeu

L'évolution dynamique d'un système peut dans une première approximation être convenablement décrite par l'emploi de forces agissant sur le système. Une force bien connue au quotidien est celle de la gravité. I. Newton a formalisé l'action gravitationnelle, celle qui décrit la chute de la pomme sur la terre ou encore le mouvement des planètes autour du soleil. Nous n'allons pas entrer dans les détails de l'impact de ces travaux de I. Newton. Mais il paraît difficile de ne pas mentionner qu'il s'agissait de la première mise en équation d'une loi de la

nature et les prédictions sur le mouvement des planètes qu'on obtenait grâce à ces travaux étaient d'une précision inimaginable. L'attraction gravitationnelle de la Terre sur un objet (telle que la pomme de I. Newton) est proportionnelle à la masse m de cet objet avec un coefficient de proportionnalité g qui vaut à la surface de la terre : $g = 9.81m/s^2$:

$$F_g = mg.$$

Cette force gravitationnelle, bien que toujours présente, n'est pas la force la plus intense. Lorsqu'on étudie des particules chargées telles que les électrons ou des ions, la force électromagnétique statique est souvent bien plus importante. Cette force, dite de Lorentz, est proportionnelle à la charge q de la particule et dépend de la vitesse v de la particule ainsi que du champ électrique et du champ magnétique appliqués :

$$F_{em} = q(E + v \times B).$$

Dans des champs électriques aussi faibles que 1V/cm, cette force est, pour un ion de sodium (Na^+) au repos, 100 millions de fois plus importante que celle de la gravité. C'est ainsi qu'il est possible d'agir sur des électrons et des ions et de les piéger dans des dispositifs appelés pièges de Paul ou pièges de Penning. Dans les années 1980, un même électron a été piégé pendant 6 mois d'affilée à l'aide de ces forces ! Les travaux effectués dans ce domaine ont d'ailleurs été couronnés par un prix Nobel de physique en 1989, partagé par W. Paul et H. Dehmelt. Nous n'allons pas non plus entrer dans les détails de ces expériences, bien qu'on retrouve certaines des techniques expérimentales et des mécanismes utilisés avec des particules chargées dans la manipulation d'atomes neutres par laser.

Lorsqu'on veut agir sur des particules neutres, telles que des atomes, la force électromagnétique statique précédente ne peut pas être utilisée telle quelle, car la charge totale q des atomes est nulle. Mais on peut faire intervenir l'action mécanique de la lumière sur des particules neutres. En effet, l'échange d'impulsion entre la lumière et la matière résulte dans une force de pression de radiation qui est proportionnelle à l'impulsion $\hbar k$ des photons et au nombre de photons $\frac{dn}{dt}$ échangés par seconde :

$$F_l = \hbar k \frac{dn}{dt}.$$

Il ne s'agit pas ici d'une nouvelle force fondamentale. On peut décrire une onde lumineuse par un champ électrique et magnétique oscillants et une étude dynamique de la force électromagnétique permet de retrouver ce résultat que nous venons d'interpréter en terme d'échange de photons. Cette force, qui est à la base du refroidissement

d'atomes par laser, permet aussi de manipuler des objets plus gros tels que des bactéries ou des billes de verre. Cette force n'a pas été utilisée avant l'avènement des lasers, car pour être efficace, il faut échanger beaucoup de photons par seconde (typiquement 100 millions de photons par seconde) pour compenser le fait que le transfert de vitesse associé à l'absorption et à l'émission d'un seul photon est très petit (de l'ordre du cm/s à comparer à la vitesse typique des particules dans un gaz à température ambiante qui est de l'ordre de 1 000 m/s). Avec les sources laser usuelles il est maintenant possible d'obtenir des forces de pression de radiation phénoménales, de l'ordre de 100 000 fois celle de l'attraction gravitationnelle terrestre. En présence de telles forces on peut donc négliger la gravité. Nous allons dans la prochaine partie détailler un peu plus l'origine de cette force et montrer comment on peut s'en servir efficacement.

3. Le ralentissement d'atomes par laser

La force de pression de radiation est basée sur le transfert d'impulsion entre les photons et les atomes. Ce processus peut être décrit par un cycle absorption - émission. Parmi les processus d'émission, on distingue l'émission spontanée et l'émission stimulée, résultant dans des mécanismes de forces différentes. Ces processus sont des processus résonnants, c'est-à-dire qu'ils sont fortement amplifiés lorsque la fréquence de la lumière laser est proche d'une fréquence de transition atomique. Nous allons nous intéresser dans un premier temps à un cycle de fluorescence, c'est-à-dire à un processus d'absorption suivi d'un processus d'émission spontanée. À résonance, l'atome peut absorber un photon, ce qui correspond à une transition entre deux orbites différentes pour les électrons qui entourent le noyau atomique. Lorsque la condition de résonance est remplie, l'énergie apportée par le photon absorbé équivaut exactement à la différence entre les niveaux d'énergie des orbites électroniques : l'énergie totale est conservée. L'état de l'atome après absorption d'un photon est appelé état excité. C'est un état instable et après un certain délai, de l'ordre de quelques nanosecondes dans les cas qui nous intéressent, l'atome émet spontanément un photon. Cette émission d'un photon correspond au retour de l'électron vers son orbite initiale, appelé état fondamental, car il correspond au niveau d'énergie minimal de l'atome.

L'absorption et l'émission d'un photon s'accompagnent ainsi d'un changement de l'état interne de l'atome, c'est-à-dire de la configuration des électrons autour du noyau. Analysons maintenant ce qui se passe pour le centre de masse de l'atome (noyau plus électron). Le photon a une impulsion $\hbar k$. Lors de l'absorption d'un photon par l'atome, cette impulsion est transférée à l'atome. Ainsi un atome initialement au repos voit sa vitesse changer de $\hbar k/m$ lors du processus

d'absorption. Lors de l'émission spontanée d'un photon, l'atome voit sa vitesse changer de la quantité $-\hbar k_{spont}/m$: c'est l'effet de recul. A partir de ces transferts d'impulsion lors d'un cycle de fluorescence on peut déduire la force moyenne imprimée par le laser sur l'atome. Le transfert d'impulsion lors des processus d'absorption est toujours identique, car tous les photons absorbés se propagent dans le même sens. Par contre les photons émis spontanément se propagent dans des directions aléatoires : en moyenne le changement d'impulsion de l'atome est donc nul. Il s'en suit que la force moyenne, qu'on déduit du changement moyen de l'impulsion par seconde, est donnée par :

$$F = \frac{\text{transfert d'impulsion}}{\text{durée moyenne d'un cycle}} = \frac{\hbar k}{\tau}$$

où τ est la durée de vie de l'état excité (instable). Cette force moyenne peut être très considérable si l'atome, dès son retour à l'état fondamental, peut de nouveau absorber un photon. Il faut que le désaccord entre la fréquence du laser et la fréquence de transition atomique soit petit par rapport à $1/\tau$ et que la lumière soit suffisamment intense, d'où la nécessité d'utiliser une source laser pour générer une telle force.

Cette force de pression de radiation résonnante peut être utilisée pour ralentir des atomes. En éclairant les atomes d'un jet atomique avec un laser se propageant en sens opposé, on les ralentit car ils sont soumis à une force opposée à leur vitesse. Une expérience de ralentissement d'atomes de césium à l'aide de sources laser semi-conducteur a été réalisée à l'École normale supérieure de Paris en 1988 [16]. Les atomes, avec une vitesse initiale de quelques centaines de mètres par seconde (de l'ordre de 1 000 km/h), ont été arrêtés sur une distance de l'ordre du mètre ! Ce ralentissement extraordinaire nécessite que les atomes soient continûment en résonance avec le laser. Or à cause de l'effet Doppler, les atomes en mouvement voient une fréquence apparente du laser décalée. (Cet effet Doppler est aussi à l'origine du phénomène de changement de fréquence entendu au passage d'une voiture qui klaxonne. Lorsque la voiture se rapproche de nous, nous entendons une fréquence plus élevée, alors que lorsque la voiture s'éloigne de nous, la fréquence apparente est plus basse). Afin de compenser ce décalage Doppler lors du ralentissement d'atomes par laser on effectue un balayage de la fréquence du laser au cours du ralentissement des atomes. Les atomes restent alors en résonance tout au long du processus de ralentissement et ils peuvent ainsi absorber et émettre continûment des photons.

Nous voyons ainsi comment il est possible d'exercer sur les atomes une force de pression de radiation résonnante, qu'on peut utiliser pour ralentir les atomes, c'est-à-dire pour diminuer leur vitesse moyenne.

4. Le refroidissement "Doppler"

Nous pouvons utiliser la force de pression de radiation résonnante pour, non seulement, diminuer la vitesse moyenne des atomes, mais aussi pour réduire la dispersion des vitesses des atomes autour de la vitesse moyenne. On utilise en général cette dispersion des vitesses autour de la valeur moyenne pour définir la température d'un ensemble de particules. Bien que nous ne puissions pas en toute rigueur utiliser la même notion de température pour décrire la modification de la distribution des vitesses des atomes par laser (il s'agit en effet d'un concept thermodynamique basé sur une mise en équilibre par des interactions entre les atomes) nous allons ici utiliser le mot température pour décrire la dispersion des vitesses des atomes, comme il est de coutume dans la communauté du refroidissement d'atomes par laser.

Pour refroidir les atomes, c'est-à-dire pour réduire leur dispersion de vitesses, T. Hänsch et A. Shawlow [9] d'une part, et D. Wineland et H. Dehmelt [10] d'autre part, ont proposé en 1975 un mécanisme basé sur des ondes lumineuses contrapropageantes. Considérons la situation dans laquelle deux ondes laser de même fréquence se propagent en sens opposé (de la droite vers la gauche et inversement). Un atome interagissant avec ces deux ondes laser sera donc soumis à une force, que nous pouvons estimer, en première approximation, à la somme des deux forces moyennes exercées par chacun des deux lasers sur l'atome. Nous choisissons la fréquence des lasers accordée en dessous de la fréquence atomique (désaccord négatif, encore appelé désaccord "rouge"). Si l'atome est au repos, les processus d'absorption ne vont pas être efficaces, car la condition de résonance n'est remplie ni pour le laser venant de la droite ni pour le laser venant de la gauche. Si maintenant l'atome se déplace vers la droite, il peut, à cause de l'effet Doppler, entrer en résonance avec le laser qui se propage vers la gauche. En effet l'atome se déplaçant en sens opposé à la propagation de l'onde laser, verra une fréquence apparente qui est augmentée. Si ce décalage Doppler compense le désaccord "rouge" initial, l'atome sera soumis à une force efficace orientée dans le sens de propagation de l'onde laser avec laquelle il entre en résonance, donc en sens opposé à son mouvement. La force exercée par l'onde se propageant dans le même sens que l'atome est tout à fait négligeable, car le désaccord apparent dans le référentiel de l'atome est encore plus grand que pour l'atome au repos. Pour un atome se déplaçant vers la gauche la situation est inversée : il entrera en résonance avec l'onde laser se propageant vers la droite et subira de nouveau une force qui s'oppose à son mouvement initial. Cette situation où la force exercée sur l'atome est toujours opposée à la vitesse de l'atome est appelée "mélasse optique" : tout mouvement d'un objet à l'intérieur de cette mélasse est rapidement amorti, quelle

que soit d'ailleurs la position spatiale de cet objet. Cette configuration laser permet donc d'amortir le mouvement des atomes et de réduire la dispersion de vitesse de l'ensemble des atomes. La limite de cette méthode de refroidissement d'atomes par laser vient du mécanisme même qui permet le refroidissement : le mécanisme physique de la force qui sert à modifier l'impulsion des atomes est basé sur les cycles de fluorescence. Les processus d'émission spontanée, qui ne contribuent pas à la force moyenne, produisent des fluctuations des vitesses des atomes. Cette fluctuation est à l'origine du processus d'échauffement qui est en compétition avec le processus de refroidissement décrit ci-dessus. À l'équilibre on obtient alors une distribution de vitesse de quelques dizaines de cm/s dans le cas des atomes de sodium, ce qui en terme de température correspond à une température de $240\mu\text{K}$, c'est-à-dire en dessous du millièème du degré Kelvin au-dessus du zéro absolu ! Ces températures extrêmement basses sont à l'origine de l'intérêt porté par la communauté scientifique au refroidissement d'atomes par laser.

5. Le piège "magnéto-optique"

Le contrôle de la position des atomes à l'aide de la lumière laser a fait l'objet de multiples études. Des mécanismes basés sur la notion de déplacement lumineux dans une onde laser focalisée ont été proposés. Mais le mécanisme le plus utilisé de nos jours pour piéger des atomes neutres préalablement refroidis par laser est basé sur le déplacement des fréquences de transition sous l'influence de champ magnétique. En étudiant les transitions atomiques dans un champ magnétique, on s'aperçoit que certaines raies se multiplient : la dégénérescence existant en l'absence du champ magnétique est levée. De plus ces transitions présentent des caractéristiques de polarisation de la lumière absorbée particulières. Cet effet est connu sous le nom d'effet Zeeman. Considérons le modèle le plus simple pour comprendre comment il est possible d'exploiter l'effet Zeeman pour confiner spatialement des atomes. Pour cela nous supposons que l'état fondamental $|g_0\rangle$ de l'atome n'a pas de moment angulaire; il ne subit donc pas de modifications dans un champ magnétique. L'état excité que nous allons considérer maintenant a par contre un moment angulaire de \hbar , ce qui implique une structure Zeeman comportant trois niveaux : $|e_-\rangle, |e_0\rangle, |e_+\rangle$. En présence d'un champ magnétique les trois transitions $|g_0\rangle \rightarrow |e_-\rangle, |g_0\rangle \rightarrow |e_0\rangle, |g_0\rangle \rightarrow |e_+\rangle$ ont des fréquences de résonances distinctes et ne peuvent être excitées qu'avec des polarisations de la lumière différentes : circulaire gauche pour la transition $|g_0\rangle \rightarrow |e_-\rangle$, linéaire pour la transition $|g_0\rangle \rightarrow |e_0\rangle$ et circulaire droite pour la transition $|g_0\rangle \rightarrow |e_+\rangle$. Le piégeage d'atomes se fait alors de la façon suivante : on utilise deux faisceaux laser avec une fréquence accordée en dessous de la transition $|g_0\rangle \rightarrow |e_0\rangle$, qui correspond à la

fréquence de transition entre l'état fondamental et les états excités en l'absence de champ magnétique. Le faisceau se propageant vers la droite est polarisé circulaire droit et le faisceau laser se propageant vers la gauche est polarisé circulaire gauche. Appliquons maintenant un champ magnétique inhomogène, qui augmente de la gauche vers la droite et qui est nul au centre. On peut obtenir un tel champ magnétique en faisant passer un courant en opposé dans deux bobines circulaires placées de façon adéquate de part et d'autre du centre de ce dispositif. Un atome immobile, placé au centre de ce dispositif, où le champ magnétique est nul ne peut absorber aucun photon. En effet à cet endroit le champ magnétique est nul et toutes les fréquences de transition sont identiques. Mais la fréquence des deux lasers étant désaccordée par rapport à la transition atomique en champ nul, aucune force ne peut être exercée par les lasers sur l'atome et l'atome reste immobile. Si maintenant l'atome est situé à gauche du centre où la composante pertinente du champ magnétique est négative, il peut se trouver à l'endroit où le déplacement de la transition $|g_0\rangle \rightarrow |e_+\rangle$ compense le désaccord en champ nul. A cause des règles de sélection sur la polarisation, seuls les photons circulaires droits peuvent être absorbés pour exciter l'atome dans le niveau e_+ et comme le laser polarisé circulaire droit se propage vers la droite, l'atome initialement à gauche du centre se trouve soumis à une force le ramenant vers le centre du dispositif. De la même façon un atome situé initialement à droite du centre se trouve dans une situation où il ne peut absorber que des photons du laser polarisé circulaire gauche se propageant vers la gauche. Ainsi l'atome se trouve de nouveau soumis à une force dirigée vers le centre du dispositif.

Dans ce mécanisme, la sélectivité de l'effet Zeeman remplace en quelque sorte la sélectivité de l'effet Doppler utilisé pour le refroidissement. Cette sélectivité fait que l'atome absorbe de façon préférentielle des photons du laser qui le ramène vers le centre du piège (dans le cas du confinement spatial) ou vers le zéro des vitesses (dans le cas du refroidissement). La particularité de ce mécanisme est qu'il est possible de refroidir et de piéger simultanément les atomes, les deux mécanismes fonctionnant avec des lasers désaccordés sur le "rouge" (en dessous de la transition atomique en champ nul).

Avec un tel piège magnéto-optique, il est maintenant possible de piéger environ 100 millions d'atomes dans un volume d'un millimètre cube à une température de l'ordre de 100 microKelvin. Comme l'obtention d'un tel ensemble d'atomes froids est relativement robuste, c'est-à-dire relativement insensible aux fluctuations d'intensité des lasers ou à leur polarisation, ce dispositif constitue de nos jours le point de départ de nombreuses expériences de physique atomique.

6. Le refroidissement “sub-Doppler” : l’effet Sisyphe

La mesure des températures obtenues par le refroidissement d’atomes par laser ne peut bien évidemment pas se faire à l’aide d’un thermomètre traditionnel. Tout d’abord les températures sont extraordinairement basses et de plus l’ensemble des atomes est très petit (quelques 100 millions d’atomes, soit une masse de l’ordre du centième du picogramme). La caractérisation des atomes se fait à l’aide d’une technique dite de temps de vol. A un instant donné, on coupe le champ magnétique et les lasers servant à piéger et à refroidir les atomes. Soumis uniquement à l’action de la gravité, les atomes tombent vers le bas et traversent un faisceau laser sonde. En détectant le temps d’arrivée des atomes dans ce faisceau sonde grâce à la lumière de fluorescence que les atomes y émettent, on peut remonter à leur vitesse initiale. En effet un atome ayant une vitesse initiale dirigée vers le haut arrivera plus tard dans la sonde en dessous du piège que les atomes qui avaient une vitesse orientée vers le bas en direction de la sonde. En enregistrant la distribution des temps d’arrivée des atomes on peut ainsi mesurer la distribution de vitesses initiales des atomes.

Ces techniques ont été mises au point en 1988 aux Etats-Unis [17] pour vérifier les prédictions du refroidissement Doppler. À la grande surprise des physiciens, les températures mesurées étaient beaucoup plus basses que prévu par la théorie Doppler. Ces résultats ont engendré immédiatement une activité théorique importante et l’on sait maintenant qu’il faut tenir compte de la structure interne plus complexe des atomes ainsi que des gradients de polarisation de la lumière pour pouvoir expliquer ces températures. Un processus fondamental, le déplacement lumineux de l’état fondamental des atomes, joue un rôle clé dans ces processus qualifiés de sub-Doppler. Une image simple de ces processus consiste à comparer l’évolution des atomes à un “effet Sisyphe” : les atomes sont soumis à un potentiel qui ressemble à une succession de vallées et de collines (les déplacements lumineux dans une onde stationnaire). Pour un désaccord négatif (le même que celui utilisé pour le refroidissement Doppler !) le pompage optique, efficace en haut des collines, remet les atomes dans des vallées de potentiel (en changeant de niveau Zeeman dans l’état fondamental). Un atome initialement en mouvement, partant d’une vallée, montera la colline de potentiel et sera ainsi ralenti. En haut d’une colline, le pompage optique remet l’atome de nouveau en bas d’une colline. Tout comme Sisyphe dans la mythologie grecque, puni par les dieux pour avoir osé défier la mort, à remonter inlassablement des pierres sur une colline, l’atome est ainsi forcé à gravir continuellement une colline de potentiel. Ce mécanisme est très efficace et permet d’obtenir des températures nettement plus basses que celles obtenues

par un refroidissement Doppler. La limite ultime qu'on obtient avec ce refroidissement Sisyphe est encore donnée par les fluctuations des cycles de fluorescence, car le pompage optique qui intervient dans l'effet Sisyphe repose sur l'émission spontanée.

7. Le refroidissement "sub-recul" : les résonances noires

Les fluctuations dues à l'émission spontanée semblaient ainsi donner une limite fondamentale pour le refroidissement laser, car il paraissait inimaginable de contrôler en pratique l'instant ou la direction d'une émission spontanée. Cependant, en 1988 nous avons imaginé et mis en œuvre un processus qui permet de s'affranchir de cette limite. L'idée sous-jacente est qu'il faut d'une façon ou d'une autre protéger les atomes refroidis de l'émission spontanée. Considérons pour cela un atome avec une structure interne en forme de lambda : deux sous-niveaux Zeeman ($|g_- \rangle$ et $|g_+ \rangle$) dans l'état fondamental et un niveau dans l'état excité ($|e_0 \rangle$). Les deux transitions $|g_- \rangle \rightarrow |e_0 \rangle$ et $|g_+ \rangle \rightarrow |e_0 \rangle$ peuvent être excitées par des lasers avec des polarisations circulaires gauche ou droite respectivement. Lorsque la fréquence des lasers est identique, les deux amplitudes de transition de l'état fondamental vers l'état excité interfèrent et donnent lieu à un état fortement couplé (pour lequel ces interférences sont constructives) et un état non couplé (pour lequel au contraire ces interférences sont destructives). Ce phénomène a été appelé "résonance noire" car bien que les deux lasers puissent être à résonance, les atomes sont pompés optiquement dans l'état non couplé et la fluorescence s'arrête.

A ce phénomène de résonance noire, découvert en 1975 [18], nous avons ajouté une sélection en vitesse. En utilisant deux lasers, excitant ces deux transitions, qui se propagent en sens opposé l'atome voit, à cause de l'effet Doppler, deux fréquences différentes dès qu'il est en mouvement. Pour un atome immobile seule la condition pour les résonances noires est remplie. Nous avons appelé cet effet "résonances noires sélectives en vitesse" [14]. Une analyse plus fine de cet effet montre qu'il faut tenir compte de la nature ondulatoire des atomes, c'est-à-dire un traitement quantique du problème devient indispensable. Il est en effet possible de refroidir les atomes en dessous de cette limite de recul donnée par les fluctuations de l'émission spontanée. Dans un tel régime, la position du centre de masse de l'atome est délocalisée sur des distances de l'ordre de la longueur d'onde du laser, c'est-à-dire de l'ordre du μm , beaucoup plus grand donc que la taille de l'atome donnée par la distance entre l'électron et le noyau atomique. On doit alors représenter l'atome par une onde, avec une longueur d'onde dite de de Broglie. Une analyse détaillée montre que la distribution de vitesse des atomes présente alors un double pic caractéristique des résonances noires sélectives en vitesse. On dispose en

fait d'un état atomique particulièrement intéressant, car il présente des corrélations quantiques entre les degrés de liberté internes de l'atome ($|g_-\rangle$ et $|g_+\rangle$) et sa vitesse ($-\hbar k$ et $\hbar k$).

8. Le refroidissement évaporatif

Le refroidissement sub-recul était très remarqué dans le domaine du refroidissement d'atomes par laser, car il permet de refroidir les atomes sans limite inférieure pour la largeur de la distribution de vitesse. Ceci était particulièrement intéressant dans le contexte de la course vers la condensation de Bose-Einstein, dont nous parlerons dans la partie suivante et qui constituait de fait un but plus ou moins avoué de la plupart des groupes travaillant dans le refroidissement d'atomes par laser.

Le principe du refroidissement évaporatif était déjà connu depuis de nombreux siècles en Inde et en Égypte. Tandis que les Romains et les Grecs utilisaient de la glace ramenée des montagnes et conservée dans les caves, les Indiens et les Égyptiens tiraient profit du refroidissement évaporatif de l'eau pendant les nuits fraîches afin d'obtenir de la glace pour refroidir leurs boissons.

Le principe du refroidissement évaporatif repose sur la diminution de température d'un ensemble de particules provoquée par la disparition d'une fraction d'entre elles ayant une énergie plus élevée que la moyenne.

Considérons une tasse de café chaud. En général, la plupart des particules composant le breuvage n'ont pas l'énergie suffisante pour passer de la phase liquide à la phase vapeur (évaporation). Seules les plus énergétiques le peuvent et, ce faisant, elles emportent leur énergie dans l'air ambiant. L'énergie moyenne des particules restantes dans le breuvage est alors diminuée. Par collisions, le système répartit ensuite l'énergie restante afin de restaurer un état d'équilibre thermodynamique (rethermalisation). Dans ce nouvel état, la température est un peu plus basse qu'initialement. Et le processus recommence jusqu'à ce que le café soit à la température ambiante. Ce processus peut être accéléré en permettant, à chaque fois, à un nombre plus élevé de particules énergétiques de s'évaporer. C'est ce qui se passe quand on souffle sur la surface du café. Ainsi évaporation et rethermalisation continues sont le mécanisme de base du refroidissement évaporatif.

Cette technique particulière de refroidissement a été développée initialement pour des atomes d'hydrogène (pour lesquels il n'existe pas de laser adéquat) [19]. Elle vient d'être récemment combinée aux techniques de refroidissement laser des alcalins (lithium, sodium, rubidium) et il a été possible de s'affranchir de certains inconvénients inhérents au refroidissement laser (comme l'échauffement produit par les fluctuations des cycles de fluorescence). Dans une première étape,

on refroidit et on piège les atomes par les techniques décrites jusque-là. Une fois les limites de ces techniques atteintes, on éteint les lasers tout en maintenant les atomes dans un piège magnétique. C'est alors que le processus d'évaporation peut commencer. Dans les expériences ce processus est accéléré par l'utilisation d'une excitation radiofréquence bien choisie qui permet aux atomes, dont l'énergie dépasse un certain seuil, de s'échapper du piège. Ce seuil est ensuite ajusté au fur et à mesure que la température des atomes restants diminue. Grâce à cette combinaison de techniques, il a été possible de battre tous les records de température et de densité obtenus par ces techniques prises isolément et de franchir le cap, si longtemps attendu, de la condensation de Bose-Einstein.

9. La condensation de Bose-Einstein

Chaque fois que des effets de cohérence ont pu être compris et maîtrisés, de nouvelles technologies ont vu le jour et ces technologies ont parfois déclenché de véritables révolutions. C'est le cas des lasers ou des matériaux supraconducteurs. En ce qui concerne les atomes, l'intuition commune consiste à les considérer comme des entités localisées. Cependant, les atomes manifestent également, dans des situations bien contrôlées, des comportements ondulatoires. Ainsi, les techniques de refroidissement permettent de préparer des atomes dont l'onde de matière associée s'étale sur plusieurs microns. Le domaine récent de l'optique atomique fait largement appel à ces propriétés ondulatoires des atomes. Que se passe-t-il si on considère non plus un atome mais une collection d'atomes dont la distance moyenne qui les sépare est inférieure à la longueur d'onde (dite de de Broglie) ? Dans une telle situation, les propriétés de statistique quantique deviennent prépondérantes et tout dépend de la nature des atomes. Ceux qui possèdent un moment angulaire intrinsèque (spin) entier peuvent se condenser tous dans le même état quantique. On les appelle des bosons et ce régime particulier est la condensation de Bose-Einstein. Les particules ne sont plus indépendantes les unes des autres mais elles constituent un ensemble macroscopique cohérent de particules indiscernables, toutes représentées par la même onde de matière. Les premières expériences de condensation de Bose-Einstein sur un ensemble dilué d'atomes ont été réalisées en 1995 [15]. Il ne fait aucun doute que cette percée aura des répercussions très importantes en recherche fondamentale et très certainement en recherche appliquée. On commence d'ores et déjà à envisager de nouveaux éléments à développer, tels que le laser à onde de matière. Pour l'instant ces expériences sont très délicates à mettre en œuvre mais il ne fait aucun doute que de substantiels progrès vont être réalisés dans un proche avenir.

III) L'UTILISATION DES ATOMES FROIDS

De plus en plus de groupes de recherche à travers le monde ont choisi d'utiliser cette technique de manipulation d'atomes et d'ions par laser et la technologie afférente. Ce renouveau de la physique atomique a ainsi généré beaucoup d'idées fécondes qui ont soit dynamisé, soit permis de développer avec succès plusieurs domaines de recherche. Citons-en quelques-unes des plus prometteuses :

- **l'optique et l'interférométrie atomique** : il s'agit d'utiliser le caractère ondulatoire des atomes pour réaliser des dispositifs semblables à ceux existant déjà en optique conventionnelle (miroirs, interféromètres, lentilles, ...). Ces appareils, s'ils sont encore loin de réaliser les critères d'une exploitation industrielle, fonctionnent parfaitement bien et permettent d'exploiter, par exemple, la sensibilité interférométrique pour des mesures à l'échelle de l'Angström. Des gyromètres et des gravimètres atomiques ont déjà vu le jour et leur champ d'application est prometteur.
- **les horloges atomiques** : la stabilité et l'exactitude des horloges atomiques, pour les standards métrologiques de temps et de fréquences, est actuellement limitée par le temps de séjour des atomes dans l'appareillage. Un gain considérable a déjà été obtenu en utilisant des atomes refroidis par laser (augmentation des temps d'interaction, diminution de certains effets systématiques). Le projet de haute technologie PHARAO, dans lequel l'École normale supérieure, le Laboratoire de l'horloge atomique et le Laboratoire primaire du temps et des fréquences sont impliqués, vise à installer une telle horloge dans un satellite en orbite autour de la terre. Un des débouchés en sciences fondamentales de telles horloges concerne des tests extrêmement fins de la relativité générale et de certains modèles cosmologiques.
- **la lithographie et l'holographie atomiques** : le contrôle extrêmement fin du mouvement des atomes par interaction laser permet de déposer sélectivement des atomes sur un substrat approprié avec une précision de l'ordre de quelques dizaines de nanomètres. Des expériences sur l'inscription de motifs ont été réalisées. Elles ouvrent des perspectives énormes dans le domaine de la nanoélectronique qui vont de pair avec le développement des techniques de micromanipulations (pinces optiques), de miniaturisation mécanique (micromoteurs) et d'observation de structures à l'échelle atomique (microscopies à force atomique, à effet tunnel, à champ proche ...). Les enjeux technologiques et indus-

triels de cette course à la miniaturisation sont énormes (micro- et nanotechnologies).

- **les pinces optiques** : les techniques de manipulation d'atomes par laser peuvent être étendues à des objets plus gros, tels que des cellules, des virus, des bactéries, des brins d'ADN ou des billes diélectriques. Une particularité de ces techniques est de pouvoir être utilisées de manière non-invasive pour le micro-organisme étudié qui vit et fonctionne normalement durant toute la durée de l'observation. Par ailleurs, ces techniques permettent aussi de manipuler les micro-objets de manière individuelle. Ainsi, si les applications biologiques de ces techniques en sont à leur début, elles ouvrent néanmoins des perspectives très prometteuses, par exemple, dans l'étude du génome humain ou dans certaines procédures de fécondation in vitro.
- **cryptographie et ordinateur quantiques** : la compréhension de plus en plus fine des implications conceptuelles de la théorie quantique, ainsi que certains progrès expérimentaux réalisés en optique quantique, ont permis de dégager des protocoles de codage, de cryptographie et des algorithmes subtils utilisant des propriétés de corrélations quantiques hautement non triviales. Ces protocoles, et leurs profondes perspectives, ont secoué un domaine dominé jusque là par des concepts classiques. Avec le degré de contrôle actuel des mécanismes de refroidissement et de piégeage d'atomes par laser, des expériences mettant en jeu ces protocoles deviennent envisageables. De ce point de vue les pièges à ions, par exemple, offrent un système modèle bien contrôlé pour l'étude expérimentale de tels protocoles.
- **chats de Schroedinger** : le degré de contrôle des effets mécaniques de la lumière sur les atomes et les ions a permis de générer très récemment des superpositions quantiques d'états "macroscopiquement" distincts. Ces états quantiques exotiques, communément appelés "chats de Schroedinger", jouent un rôle particulièrement important dans la compréhension conceptuelle du rôle de l'environnement dans les mécanismes de transition vers un régime classique (rôle de l'observation et de la mesure, décohérence quantique). Sur un plan plus pratique, ces études fixent les limites de faisabilité des protocoles d'algorithme et de cryptographie quantiques.
- **états comprimés de la lumière** : une étude fine de la précision que l'on peut atteindre avec des techniques interférométriques montre que le caractère corpusculaire de la lumière joue un rôle

fondamental. Ce bruit de photons peut ainsi limiter cette précision dans certaines situations expérimentales, par exemple si le temps de mesure est limité ou s'il existe un flux lumineux maximal à ne pas dépasser. On trouve ce type de contraintes dans le projet européen VIRGO de détection des ondes gravitationnelles. Des recherches menées pour contourner cette limitation visent à produire des états non classiques du rayonnement, dits états comprimés de la lumière, et à effectuer ce que l'on appelle des mesures quantiques non destructives. Les atomes refroidis par laser constituent, de ce point de vue, un milieu modèle permettant de tester et d'explorer les potentialités de ces concepts.

- **condensat de Bose-Einstein** : En 1995, un des plus importants objectifs de la communauté scientifique du refroidissement laser a été réalisé : la condensation de Bose-Einstein d'un gaz d'atomes. Ce que certains appellent un "nouvel état de la matière" constitue en fait un ensemble macroscopique d'atomes aux propriétés quantiques collectives non triviales. À l'heure actuelle, une nouvelle course s'est déjà engagée : le "laser à atomes", c'est-à-dire une source cohérente d'ondes de matière. Ceci constitue un enjeu scientifique majeur dont l'aboutissement maîtrisé pourrait constituer une percée comparable à celle créée par la réalisation des sources lasers en optique conventionnelle.

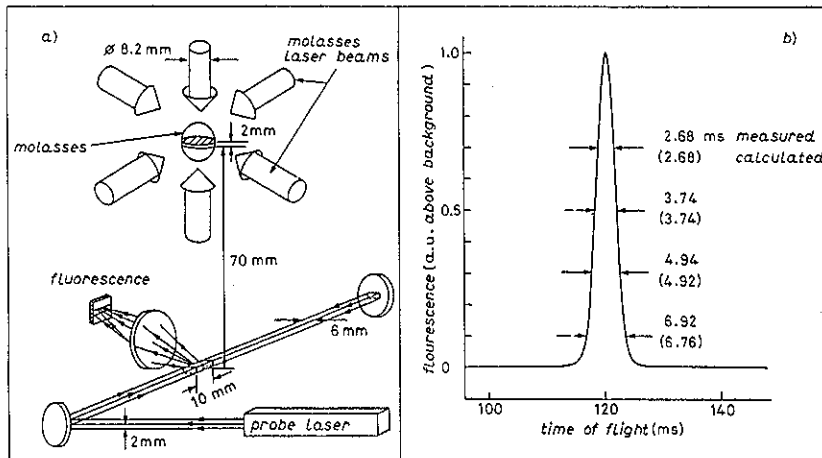
IV) CONCLUSION

Nous avons donné dans cet article un rapide aperçu des techniques de refroidissement d'atomes par laser qui ont été développées depuis le milieu des années 1980. Le contrôle du mouvement des atomes qu'on sait ainsi obtenir a ouvert de nombreuses voies de recherche prometteuses. On ne considérera dorénavant plus les atomes simplement comme des particules, mais leur caractère ondulatoire pourra être mis en évidence dans des situations expérimentales particulières. On doit tenir compte de leur cohérence spatiale telle qu'elle est mise en évidence par exemple dans des expériences récentes d'oscillation de Bloch [20] longtemps prédites en physique du solide. Les corrélations entre ondes de matière donnent un autre aspect passionnant aux recherches en cours où l'on améliore de plus en plus la précision de la préparation d'un échantillon atomique. N'oublions pas de mentionner que le contrôle précis de ces ondes de matière peut aussi être utilisé pour des études de systèmes complexes, moins bien contrôlés : des études de chaos quantique mélangent ainsi des notions de pureté de préparation et des complexités d'évolution du système.

Je tiens à exprimer ma reconnaissance à Alain Baumann et à remercier Jean-Paul Pier pour l'organisation de cette conférence ainsi que Christian Miniatura pour une relecture de cette contribution.

Références

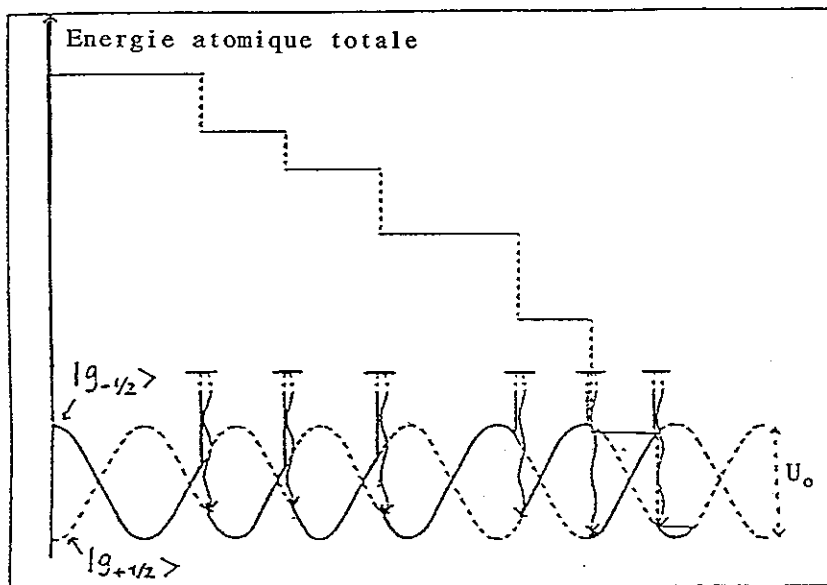
- [1] J.C. Maxwell, "A Treatise on Electricity and Magnetism", (Oxford University Press, 1871).
- [2] A. Bartoli, *Nuove Cimento* **15**, 195 (1883).
- [3] P. Lebedev, *Ann. Phys. (Leipzig)* **6**, 433 (1901).
- [4] E.F. Nichols, G.F. Hull, *Phys. Rev.* **13**, 307 (1901).
- [5] A. Einstein, *Phys. Z.* **18**, 121 (1917).
- [6] R. Frisch, *Z. Phys.* **86**, 42 (1933).
- [7] A. Kastler, *J. Phys. Rad.* **11**, 255 (1950).
- [8] R. Schieder, H. Walther, L. Wöste, *Opt. Comm.* **5**, 337 (1972).
- [9] T.W. Hänsch, A. Schawlow, *Opt. Comm.* **13**, 68 (1975).
- [10] D. Wineland, H. Dehmelt, *Bull. Am. Phys. Soc.* **20**, 637 (1975).
- [11] S. Chu, L. Hollberg, J.E. Bjorkholm, A. Cable, A. Ashkin, *Phys. Rev. Lett.* **55**, 48 (1985).
- [12] E.L. Raab, M. Prentiss, A. Cable, S. Chu, D.E. Pritchard, *Phys. Rev. Lett.* **59**, 2631 (1987).
- [13] J. Dalibard, C. Cohen-Tannoudji, *J.O.S.A. B* **6**, 2023 (1989).
- [14] A. Aspect, E. Arimondo, R. Kaiser, N. Vansteenkiste, C. Cohen-Tannoudji, *Phys. Rev. Lett.* **61**, 826 (1988). A. Aspect, E. Arimondo, R. Kaiser, N. Vansteenkiste, C. Cohen-Tannoudji, *J.O.S.A. B* **6**, 2112 (1989).
- [15] M.H. Anderson, J.R. Ensher, M.R. Matthews, C.E. Wieman, E.A. Cornell, *Science* **269**, 198 (1995).
- [16] C. Salomon, J. Dalibard, *C. R. Acad. Sci. Paris*, **306**, 1319 (1988).
- [17] P.D. Lett, R.N. Watts, C.I. Westbrook, W.D. Phillips, P.L. Gould, H.J. Metcalf, *Phys. Rev. Lett.* **61**, 169 (1988).



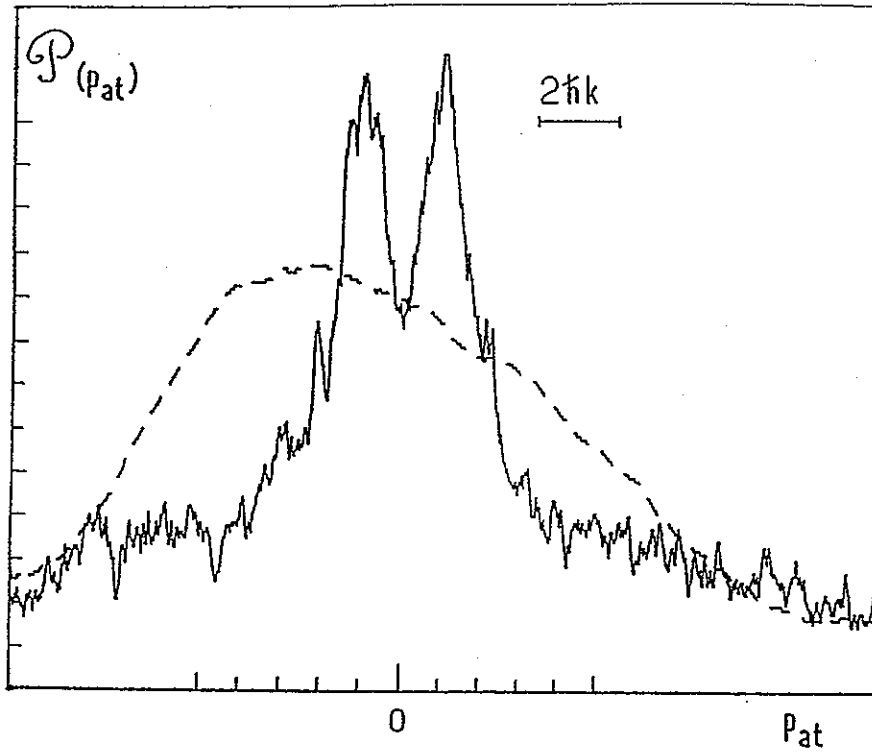
Mesure par « temps de vol » de la distribution de vitesse d'une «mélasse optique»:

(a) A $t=0$, les faisceaux laser mélasse sont débranchés et les atomes sont relâchés. Ils tombent ensuite sous l'effet de la gravité à travers un faisceau sonde placé en dessous de la mélasse initiale. Le temps d'arrivée des atomes dans la sonde dépend de leur vitesse initiale.

(b) Signal de fluorescence en fonction du temps. Les flèches indiquent le résultat d'une simulation numérique pour une température initiale de $2.5 \mu\text{K}$. (extrait de C. Salomon, J. Dalibard, W. Phillips, A. Clairon, S. Guellati, Europhys. Lett. 12,683,1990)



Principe du refroidissement Sisyphus: l'atome perd de l'énergie potentielle à chaque fois qu'il effectue une transition entre les niveaux $g_{+1/2}$ et $g_{-1/2}$ car la probabilité de transition est maximale aux maximums des potentiels lumineux.



Distribution de l'impulsion atomique transverse à la fin de la zone d'interaction, avec laser (courbe continue), ou sans laser (pointillés; le bruit est ici lissé). Les deux pics à $\pm \hbar k$ (recoil du photon), au-dessus de la distribution initiale, sont la signature de l'effet de refroidissement présenté ici.

L'intérêt des idées de Gabriel Lippmann pour les mathématiques

Jean-Paul Pier
Centre universitaire de Luxembourg

“Dès l’instant qu’on est amené à sortir de la routine, on tombe dans le domaine de l’imprévu, de l’inattendu, réservé aux chercheurs et aux savants.

Toutes les ressources de l’analyse mathématique et de l’expérience peuvent être mises en réquisition. On ne peut combiner un objectif nouveau sans l’aide des mathématiques.”

Voilà un court extrait d’un article de Gabriel Lippmann, membre de l’Institut grand-ducal, paraissant en 1907 au tome II d’un périodique dont le titre est *Revue luxembourgeoise Littérature - Art - Science*. Le terme d’objectif utilisé ici devait être bien familier à un physicien aussi prestigieux que Lippmann. Alors que ce savant est connu principalement pour ses travaux en optique, il a été dans plusieurs sens du terme un visionnaire et bien qu’il n’ait pas été mathématicien au sens véritable du terme, il a mesuré l’importance fondamentale de cette science. Faut-il rappeler que ses chemins se sont souvent croisés avec ceux de Henri Poincaré qui a été mathématicien, physicien, astronome et même philosophe, l’un des plus grands mathématiciens de tous les temps et en tout cas, chronologiquement parlant, le dernier mathématicien universel.

Lippmann a été le prédécesseur de Poincaré dans la chaire de Calcul des Probabilités et de Physique mathématique à la Sorbonne, mais c’est aussi Lippmann qui prononcera l’éloge funèbre de Poincaré. Comment se fait-il qu’en 1883 cette chaire soit attribuée à un physicien ? A ce sujet, il faut écouter le commentaire du mathématicien Charles Hermite recommandant l’élection de Lippmann :

“[Les] nouvelles théories de l’électricité et de la thermodynamique ne peuvent désormais rester en dehors de l’enseignement de la Sorbonne et, comme l’analyse mathématique ne leur est pas moins néces-

saire qu'à l'astronomie et à la mécanique céleste, nous pensons qu'elles doivent être exposées dans le cours de physique mathématique".

Présidant la séance solennelle de l'Académie des sciences de Paris qui a lieu le 16 novembre 1912, en hommage à la mémoire de Poincaré, Gabriel Lippmann expose ses opinions sur la place des mathématiques :

"Le don mathématique est pareil au don de la vision ; il n'a pas l'œil pour organe, mais il nous fait percevoir la vérité par une de ces innombrables faces : c'est un sens de l'âme, comme dirait le géomètre Platon [...]

La musique, par exemple, la musique sans libretto ni titre, la musique pure, et c'est la plus belle, est-elle moins abstraite que la géométrie ? Une mélodie l'est-elle moins qu'un théorème ? Ces catégories irréductibles de la connaissance ne nous donnent, il est vrai, qu'une sorte d'analyse naturelle et spontanée de la réalité infiniment complexe. Il faut ensuite la synthèse ; et celle-ci arrive, souvent inconsciente et involontaire, mais garantie toujours par l'harmonie pré-établie entre les facultés distinctes. C'est par une synthèse de cet ordre que, par la fusion entre deux images distinctes et non superposables, se produit la perception du relief [...]

Le mathématicien, en développant les facultés qui le distinguent, en augmentant désormais leur puissance, contribue pour sa part à cette évolution de l'espèce, qui est un progrès, et dont la science fait essentiellement partie."

Alors que l'impact de l'œuvre de Lippmann physicien est parfaitement mis en évidence grâce aux physiciens dans cette brochure et que, par exemple, l'équation aux dérivées partielles dite de Lippmann concernant l'électrocapillarité est plutôt à ranger dans le domaine de la physique, nous nous proposons d'évoquer deux domaines des mathématiques qui seront développés ultérieurement à Lippmann, mais dont il a pu sentir la portée, à savoir le Calcul des Probabilités puisqu'il a occupé la chaire portant ce titre, et l'étude de phénomènes harmoniques, évidemment liée à l'optique physique.

En l'an 1900, le grand mathématicien David Hilbert, au cours de sa fameuse conférence prospective sur les vingt-trois problèmes mathématiques majeurs du XX^e siècle, ne manque pas de prédire un avenir important au Calcul des Probabilités :

"Les recherches sur les principes fondamentaux de la géométrie nous conduisent à envisager ce problème : Traiter sur ce modèle les branches de la Physique où les Mathématiques jouent aujourd'hui un rôle prépondérant ; ces branches de la Science sont, avant toutes autres, le Calcul des Probabilités et la Mécanique."

Jusque-là le Calcul des Probabilités est basé en grande partie sur le

schéma de Bernoulli, une idéalisation du jeu de pile ou face. Soit S_n le nombre de réalisations d'un événement de probabilité p en n épreuves répétées identiques et indépendantes. La formule de Bernoulli s'écrit

$$P(S_n = k) = \binom{n}{k} p^k q^{n-k}$$

où $q = 1 - p$, $\binom{n}{k}$ est le nombre des combinaisons de n objets k à k , i. e. le nombre des sous-ensembles à k éléments dans un ensemble à n éléments. La loi des grands nombres de Bernoulli exprime que la moyenne $\frac{S_n}{n}$ se rapproche de p au fur et à mesure que n augmente ; plus précisément, pour $\epsilon > 0$ donné

$$P\left(\left|\frac{S_n}{n} - p\right| < \epsilon\right) \rightarrow 1.$$

On parle encore de la loi de stabilité des fréquences.

Polya introduira la dénomination *théorème central limite* pour le fameux énoncé suivant : Si $p \neq 0, p \neq 1, x \in \mathbb{R}$, lorsque $n \rightarrow \infty$,

$$P\left(\frac{|S_n - np|}{\sqrt{npq}} < x\right) \rightarrow \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{y^2}{2}} dy$$

Auparavant, on a parlé du *théorème de de Moivre-Laplace*. De Moivre l'a formulé dans le cas $p = \frac{1}{2}$ et l'a envisagé dans le cas général ; Laplace l'étudie explicitement.

Poincaré parle à ce sujet de la *loi de Gauss*. Il dit que la loi est *normale* si $\int_{x_0}^{x_1} \frac{h}{\sqrt{\pi}} e^{-h^2 x^2} dx$ représente la valeur de la probabilité pour que le nombre x soit compris entre x_0 et x_1 . En 1901, Liapounov donnera une preuve du théorème central limite. En 1910, Markov fournira un premier exemple où l'intégrale dite de Laplace $\frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{t_1}^{t_2} e^{-t^2} dt$, comme il l'écrit

"sert de limite à la probabilité que la somme de ces valeurs sera comprise entre des limites fixées."

Au sujet de ce phénomène de la plus haute importance, un mathématicien probabiliste récemment disparu, Daniel Dugué, successeur de Poincaré et de Lippmann à la Sorbonne, d'autre part membre d'honneur de la section des sciences de l'Institut grand-ducal, affirme qu'on attribue à Lippmann la phrase suivante :

"Les expérimentateurs considèrent cette loi comme un résultat théorique et les théoriciens comme un fait expérimental".

Dans les notes d'un cours d'astronomie générale de Poincaré professé à l'École polytechnique de Paris en 1907-1908 qui nous ont été prêtées par cette institution, on peut lire :

"On admet que dans toutes les observations les erreurs accidentelles obéissent à la loi de Gauss : La probabilité pour que l'erreur

soit comprise entre x et $x + dx$ est $Ke^{-hx^2} dx$, h et K désignant deux constantes.

La loi de Gauss est généralement admise, soit comme un théorème, soit comme un fait d'expérience. En réalité elle n'a pas été démontrée rigoureusement et l'expérience ne la vérifie pas toujours. La loi de Gauss sera applicable chaque fois que l'erreur totale sera la résultante d'erreurs partielles, accidentelles, très nombreuses, très petites et indépendantes."

Dans son ouvrage sur le Calcul des Probabilités, Poincaré écrit :

"[Cette loi des erreurs] ne s'obtient pas par des déductions rigoureuses ; plus d'une démonstration qu'on a voulu en donner est grossière, entre autres celle qui s'appuie sur l'affirmation que la probabilité des écarts est proportionnelle aux écarts. Tout le monde y croit cependant, me disait un jour M. Lippmann, car les expérimentateurs s'imaginent que c'est un théorème de mathématiques, et les mathématiciens que c'est un fait expérimental."

L'ère moderne du Calcul des Probabilités commence avec le mémoire de Borel de 1909. L'axiomatisation de la théorie est formalisée par Kolmogorov en 1933.

Un peu plus tôt Paul Lévy constate que pour définir une variable aléatoire on a intérêt à considérer la fonction $F(x)$, dite de répartition plus tard, c'est-à-dire la probabilité pour que la variable aléatoire soit inférieure à x . Dès 1925 Lévy fait usage de l'intégrale de Stieltjes dans ce contexte. A la variable aléatoire X est associée une fonction de distribution F_X sur les nombres réels, i. e. une fonction croissante, continue à droite, telle que $\lim_{x \rightarrow 0} F_X(x) = 0$, $\lim_{x \rightarrow \infty} F_X(x) = 1$. Via la relation

$$P_X(| - \infty, x]) = F_X(x)$$

s'établit une correspondance biunivoque entre les fonctions de distribution F_X et les probabilités P_X .

Les études de Lippmann en optique s'inscrivent dans une lointaine filiation avec l'œuvre de Newton qui a forgé le terme de *spectre* pour désigner les images juxtaposées formant une suite ininterrompue de couleurs et correspondant à la décomposition de la lumière blanche par réfraction ou par diffraction. Les travaux de Lippmann concernent ainsi un contexte mathématique ondulatoire dont les origines remontent aux travaux de Fourier et qui connaissent un développement prodigieux à l'époque contemporaine, à savoir l'*analyse harmonique*.

Au cours d'une conférence prononcée à Metz le 30 janvier 1906, Emile d'Huart, professeur de chimie à l'Athénée de Luxembourg, ancien élève de Lippmann à Paris, s'exprime ainsi :

“En théorie, le son et la lumière se ramènent à la même cause primordiale : à la vibration qui se propage. Le son peut être enregistré sur le disque du phonographe, pourquoi la possibilité d'être enregistré d'une manière analogue sur la plaque photographique n'existerait-elle pas pour la lumière ?

M. Lippmann a montré qu'elle existe.”

Auguste et Louis Lumière écrivent dans un article de 1896 :

“N'est-il pas, en effet, merveilleux de déduire d'idées théoriques sur la nature ondulatoire de la lumière un procédé d'enregistrement photographique des couleurs ?

Indépendamment de la reproduction des couleurs, la géniale découverte de M. Lippmann constitue incontestablement une éclatante et lumineuse confirmation de la théorie des ondulations.”

En effet, un aspect remarquable, assez exceptionnel, caractérise la démarche de Lippmann dans son invention du procédé interférentiel de la photographie des couleurs. La méthode a été imaginée théoriquement et la mise en pratique commence par une phase de bricolage habile. Peu après la présentation de ses résultats expérimentaux à l'Académie des sciences en 1891-1892, Lippmann expose en 1895 la théorie complète expliquant le processus à l'aide du formalisme de Fourier qui n'avait guère fait son entrée en optique auparavant.

Lippmann commence sa présentation en parlant du cas simple où l'impression photographique est due à une lumière monochromatique de longueur d'onde λ . Soit z la distance d'un point au plan limitant la couche sensible adossée au miroir réfléchissant. L'interférence entre les rayons incident et réfléchi donne lieu à une vibration stationnaire d'intensité proportionnelle à $4 \sin^2 \frac{2\pi z}{\lambda}$; en ce point le pouvoir réflecteur s'exprime sous la forme $\rho = \epsilon \varphi(\sin^2 \frac{2\pi z}{\lambda})$, ϵ dépendant des conditions de l'expérience.

On considère ensuite un éclairage en lumière blanche et la *constituante* formée par la lumière *homogène* de longueur d'onde λ' . Après réflexion sur un élément situé en z et de profondeur infiniment petite dz l'amplitude incidente $\sin \frac{2\pi t}{T}$, t étant le temps et T étant la période, est multipliée par ρdz et subit une perte de phase $2\pi \frac{2z}{\lambda'}$; alors

$$y = \rho dz \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{2z}{\lambda'} \right) = \rho dz \cos \frac{4\pi z}{\lambda'} \sin \frac{2\pi t}{T} - \rho dz \sin \frac{4\pi z}{\lambda'} \cos \frac{2\pi t}{T}.$$

Il s'agit maintenant d'intégrer de $z = 0$ à $z = Z$, Z étant l'épaisseur de la couche ; on obtient l'expression

$$X \sin \frac{2\pi t}{T} - Y \cos \frac{2\pi t}{T}$$

avec

$$X = \int_0^Z \rho \cos \frac{4\pi z}{\lambda'} dz, Y = \int_0^Z \rho \sin \frac{4\pi z}{\lambda'} dz.$$

Pour connaître l'amplitude résultante $\sqrt{X^2 + Y^2}$ Lippmann va discuter l'expression

$$X + Yi = \int_0^Z \rho \left(\cos \frac{4\pi z}{\lambda'} + i \sin \frac{4\pi z}{\lambda'} \right) dz.$$

Au prix d'une imprécision négligeable, l'intervalle d'intégration va être subdivisé par $0, \frac{\lambda}{2}, 2\frac{\lambda}{2}, \dots, n\frac{\lambda}{2} = Z$. Comme la fonction φ est de période $\frac{\lambda}{2}$, si on pose

$$u = \cos \frac{2\pi}{\lambda'} + i \sin \frac{2\pi}{\lambda'},$$

on peut écrire grâce à la formule dite de Moivre

$$X + Yi = \int_0^{\frac{\lambda}{2}} \rho \left(\cos \frac{4\pi z}{\lambda'} + i \sin \frac{4\pi z}{\lambda'} \right) dz \times \Sigma$$

où

$$\Sigma = 1 + u + u^2 + \dots + u^n.$$

Si $\lambda' \neq \lambda$, $\Sigma = \frac{1-u^{n+1}}{1-u}$; Σ reste fini même si n tend vers l'infini. On détermine ϵ de façon à ce que $n\epsilon$ reste fini ; il est loisible de choisir $\epsilon = \frac{1}{n}$. L'amplitude tend vers 0 quand Z et donc n augmentent indéfiniment.

Par contre, si $\lambda' = \lambda$, on a $\Sigma = n + 1$; l'amplitude tend vers une quantité finie si $n\epsilon = 1$. Lippmann note que la conclusion serait la même pour $\lambda' = 2\lambda, \lambda' = 3\lambda$, etc. Il écrit :

"La couche sensible n'a donc un pouvoir réflecteur différent de zéro que dans le cas où la longueur d'onde de la vibration incidente est égale à celle de la vibration photographiée ou à l'un de ses sous-multiples."

Et il ajoute :

"Le cas $\lambda = \lambda'$ est seul réalisé dans la pratique, à cause de la faible longueur du spectre visible qui comprend moins d'une octave."

Dans la seconde partie du travail, pour le cas général de la lumière incidente hétérogène Lippmann doit considérer des expressions

$$X = \frac{1}{Z} \int_A^B \int_0^Z f(\lambda) \varphi \left(\sin^2 \frac{2\pi z}{\lambda} \right) \cos \frac{2\pi z}{\lambda'} d\lambda dz,$$

$$Y = \frac{1}{Z} \int_A^B \int_0^Z f(\lambda) \varphi \left(\sin^2 \frac{2\pi z}{\lambda} \right) \sin \frac{2\pi z}{\lambda'} d\lambda dz.$$

Il s'autorise le renversement de l'ordre des intégrations. Il écrit alors :

"Les intégrales doubles X et Y sont analogues à une intégrale découverte par Fourier et qui se réduit, elle aussi, à un seul de ses éléments."

Pour le démontrer, on peut avoir recours non à l'analyse de Fourier, mais à la démonstration géométrique qu'il y a ajoutée et qui est plus générale."

Lippmann explicite le développement en série trigonométrique

$$\varphi\left(\sin^2 \frac{2\pi z}{\lambda}\right) = C_0 + C_1 \cos \frac{2\pi z}{\lambda} + C_2 \cos \frac{4\pi z}{\lambda} + \dots + C_m \cos \frac{2\pi m z}{\lambda} + \dots$$

avec les coefficients (de Fourier)

$$C_0 = \frac{1}{\lambda} \int_0^{\frac{\lambda}{2}} \varphi\left(\sin^2 \frac{2\pi z}{\lambda}\right) dz,$$

$$C_m = \frac{2}{\lambda} \int_0^{\frac{\lambda}{2}} \varphi\left(\sin^2 \frac{2\pi z}{\lambda}\right) \cos \frac{2\pi m z}{\lambda} dz.$$

En procédant encore comme dans la première partie, *i. e.* en réappliquant le *raisonnement de Fourier*, Lippmann vérifie une nouvelle fois que la seule contribution non nulle correspond au cas $\lambda' = \lambda$.

Daniel Bernoulli, Euler, Lagrange, d'Alembert, puis essentiellement Fourier ont déployé des efforts conduisant au développement d'une fonction f de période 2π en une série convergente

$$\frac{1}{2}a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos nx + b_n \sin nx).$$

Si ce développement est possible, les coefficients de Fourier a_n, b_n sont déterminés à l'aide des formules

$$a_0 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \pi f(x) dx,$$

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \cos nx dx,$$

$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \sin nx dx.$$

La forme complexe de la série trigonométrique est

$$\sum_{n=-\infty}^{\infty} c_n e^{inx}$$

avec

$$c_n = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) e^{-inx} dx ;$$

c'est la formule de la *transformation de Fourier*.

pour $\Phi(x, y) = (Ax|y)$, on écrit $A = \int \lambda dE_\lambda$.

Dans certains domaines actuels des mathématiques pures ou appliquées, le traitement du signal et de l'image, une nouvelle théorie tend à remplacer l'analyse de Fourier traditionnelle. L'actualité de l'analyse de Fourier est attestée par cette *théorie des ondelettes*. Il s'agit d'une analyse de Fourier locale qui se concentre immédiatement sur le support singulier de la fonction à analyser ; autrement dit, hors du support singulier, la fonction est indéfiniment dérivable et les coefficients de Fourier correspondants sont négligeables.

De Lippmann, élève en année préparatoire au lycée parisien qui recevra le nom de Henri IV, son professeur a affirmé qu'il avait une passion malheureuse pour les vers latins. Mais y a-t-il vraiment incompatibilité entre une passion quelque peu assouvie de culture générale et une grande activité scientifique ? Nous pourrions rappeler une citation due à un mathématicien contemporain (Roger Godement), bien connu en analyse harmonique :

"Hilbert réalisant la décomposition spectrale des opérateurs linéaires, Perrin analysant le bleu du ciel, Monet, Debussy et Proust recréant, pour notre émerveillement, le scintillement de la lumière sur la mer, travaillaient tous dans le même but qui sera aussi celui de l'avenir : la connaissance de l'univers total."

En juin 1894, les frères Lumière présentent au Photo-Club de Paris quatre portraits obtenus par une méthode interférentielle inspirée par les procédés de Lippmann. Un chroniqueur de l'époque écrit :

"Toutes les couleurs sont rendues et chantent, comme disent les peintres, avec leurs intensités respectives."

Alors que Lippmann constitue un maillon de toute première importance de l'époque qui a mis en route le développement de la photographie dans toutes ses variantes, celle de Niepce, de Daguerre, des frères Lumière, mais aussi le monde des couleurs de l'impressionnisme, sachons lui gré d'avoir pu écrire en 1891 au moment de la présentation de son travail célèbre :

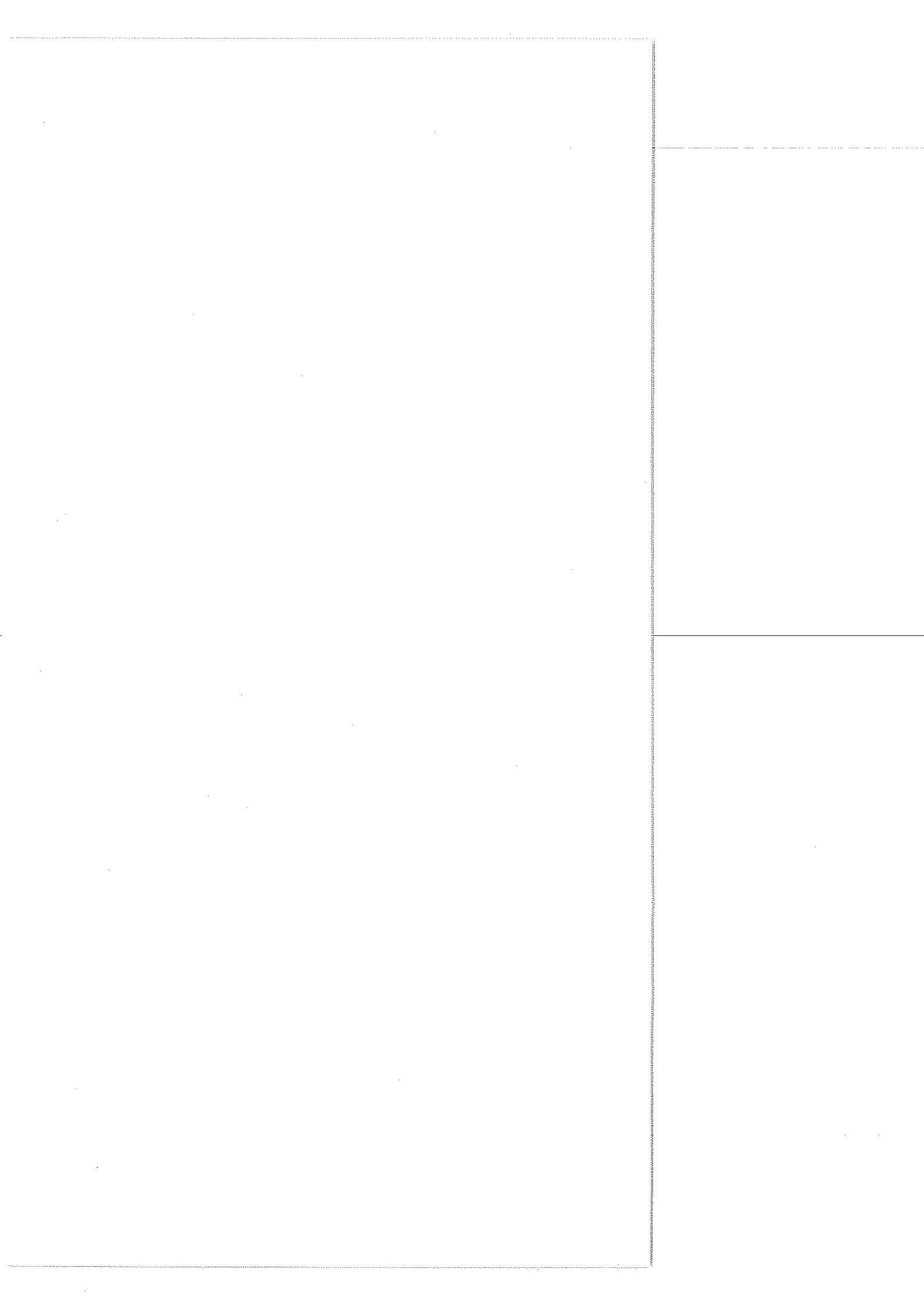
"Je me suis proposé d'obtenir sur une plaque photographique l'image du spectre avec ses couleurs, de telle sorte que cette image demeurât fixée et pût rester indéfiniment au grand jour sans s'altérer."

Références

Lippmann, Gabriel. Sur la théorie de la photographie des couleurs simples et composées par la méthode interférentielle. C. R. Acad. Sci. Paris 15/1/1894 , p. 92-102. Journal de physique III (mars 1894), p. 97-107.

Lumière, Auguste et Louis. Société française de photographie, 3/1/1896.

Séminaire de mathématique
Centre universitaire de Luxembourg
162 A, avenue de la Faïencerie
L-1511 Luxembourg



The Mach-Lippmann analogy between heat and electricity

Jean-François Pommaret

Centre d'Enseignement et de Recherche en Mathématique
Informatique et Calcul Scientifique (CERMICS)
Ecole Nationale des Ponts et Chaussées (ENPC)

Summary : The purpose of this essay is to give a group theoretical interpretation of the analogy existing between elasticity, heat and electromagnetism. After recalling the analogy discovered by E. Mach in 1871 and, independently, by G. Lippmann in 1876 between absolute temperature and electric potential, we sketch how modern mathematics (group theory, jet theory) can allow to understand this analogy in such a way as to unify the corresponding finite element methods in engineering sciences. Our result also goes along lines discovered at the beginning of the century by the brothers E. and F. Cosserat for elasticity and H. Weyl for electromagnetism.

Key words : Absolute temperature, Electric potential, Thermodynamics, Electrodynamics, Group theory, Finite elements.

In tales for children, all fairies are usable able to transform into gold any object they touch with their magic stick.

In scientific research, on the contrary, only a very restricted number of physicists and mathematicians are able to enlight, at the same time or successively, many different domains by a genius stroke. As one of the best known examples one can quote H. Poincaré for his works on analysis, dynamical systems, electron theory, celestial mechanics, ... or A. Einstein for his works on special and general relativity, Brownian motion, statistical and quantum mechanics, ... One must not forget in particular that the latter did receive the Nobel prize in 1921 officially for his contribution to theoretical physics, more precisely for

his discovery of the photoelectric law, and not for his relativity theory, still too much controversial at that time.

A similar situation is encountered with Gabriel Lippman (1845-1921) who made original works on electricity, capillarity, thermodynamics, seismic phenomena but did receive the Nobel prize in 1908 for his discovery of color photography.

In this essay, we shall be concerned with a specific aspect of his work, namely the discovery of the "*principle of conservation of electricity*" in 1876 and its corollary concerning an analogy existing between the *absolute temperature* existing in heat phenomena and the *electric potential* existing in electrical phenomena [14].

Before recalling this analogy, we find it useful to sketch briefly the career of Lippmann, pointing out his meeting in Berlin with Helmholtz who was also concerned at that time with the analogy existing between analytical mechanics and thermostatics known today as the "*Helmholtz analogy*" [4] [5].

After studying probably under the supervision of ... his mother, he entered Lycée Henri IV in Paris at the age of 13 and became interested in physics by his teacher d'Almeida. He joined Ecole Normale Supérieure in 1868 but got Doctor degrees first in Heidelberg (1873) and then in Paris (1875) where his thesis deals with electro-capillarity. On this occasion, he discovered that such a phenomenon is "*reversible*", that is, electricity may produce a variation of the surface limiting a column of mercury but, conversely, such a variation of surface may produce a difference of electric potential.

It is important to notice that in the meantime, Lippmann paid a short visit to H. von Helmholtz in Berlin just at a moment when scientists started to be attracted by the possibility to interpret thermodynamics, at least thermostatics, and electric phenomena through a common mechanical origin. The basic idea was to use similarly, in both domains and on the *macroscopic level*, a variational calculus adapted from the standard powerful one already existing in analytical mechanics, rather than a purely particle-like description on a *microscopic level*. As a byproduct, it is not possible to separate the *Mach-Lippmann analogy* from the *Helmholtz analogy* that we now recall.

In analytical mechanics, if $L(t, q, \dot{q})$ is the *Lagrangian* of a mechanical system, one easily gets the *Hamiltonian* $H = q \frac{\partial L}{\partial \dot{q}} - L$ where t is time, q represents a certain number of dependent variables or *generalized position*, allowing to define the position of the various rigid bodies constituting the system (coordinates of center of gravity, relative angles, ...) and \dot{q} is the derivative with respect to time or *generalized speed*. There are two ideas behind such a construction. The first is to introduce the energy as in the movement of a point of mass m with

Cartesian coordinates (x, y, z) vertical) or (x^1, x^2, x^3) vertical) in the gravitational field \vec{g} where $L = \frac{1}{2}m(\dot{x}^2 + \dot{y}^2 + \dot{z}^2) - mgz$ and thus $H = \frac{1}{2}m(\dot{x}^2 + \dot{y}^2 + \dot{z}^2) - mgz$. The second is to take into account the well known Euler-Lagrange equations $\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}} \right) - \frac{\partial L}{\partial q} = 0$ implied by the variational condition $\delta \int L(t, q, \dot{q}) dt = 0$ and to obtain therefore :

$$\frac{dH}{dt} = \dot{q} \left(\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}} \right) - \frac{\partial L}{\partial q} \right) - \frac{\partial L}{\partial t} = -\frac{\partial L}{\partial t}$$

that is the conservation of energy along the trajectories whenever L does not contain t explicitly.

Similarly, in thermostatics, if F is the *free energy* of a system at absolute temperature T , we may obtain, *in general*, the *internal energy* U by the formula : $U = F - T \frac{\partial F}{\partial T}$. We explain the underlying difficulty (most of the time skipped in textbooks !) in the case of a perfect gas with pressure P , volume V and entropy S for one mole [11]. The *first principle* of thermostatics says that the sum of the exchange of work $\delta W = -PdV$ and the exchange of heat δQ between the system and its surrounding is a total differential $dV = \delta W + \delta Q$. Now, the *second principle* of thermostatics says that $\delta Q = TdS$ or equivalently that $\frac{\delta Q}{T} = dS$ is a total differential with absolute temperature (care !) as integrated factor. One must notice that if α and β are two 1-forms, it is easy to check that $\alpha + \beta$ is a total derivative by *checking* $d(\alpha + \beta) = 0$ where d is the exterior derivative, a condition amounting to check that all differences $\partial_i(\alpha_j + \beta_j) - \partial_j(\alpha_i + \beta_i)$ vanish. It is not so well known that the existence of an integrating factor for β just amounts to *check* $\beta \wedge d\beta = 0$ where \wedge is the symbol of exterior multiplication. Now, we have $dU = -PdV + TdS$, a result giving U as a function of V and S . As V has a *geometric meaning* that S does not possess, engineers use to do a Legendre transformation by introducing $F = U - TS$ in order to have $dF = -PdV - SdT$ where F is now a function of V and T that can be measured. It follows that $S = -\frac{\partial F}{\partial T}$ in this situation because $\delta W = -PdV$ does not contain dT . Of course, *contrary to S , T can be measured* [21] *though it does not seem to have a geometric meaning like V* . In general, the 1-form δW depends linearly on the differentials of *all* the state variables (dV and dT in our case) and *there is no reason at all to have again $S = -\frac{\partial F}{\partial T}$* . To avoid such a situation, *Helmholtz postulated the possibility for any system to choose "normal" state variables such that dT should not appear in δW* .

Through this result is still not known we have proved in [23] (p. 713) that *this is no longer a postulate but a theorem ... amounting to the two principles !* Therefore if one could introduce V and T on an equal geometric footing, then $dF = -PdV - SdT$ should already contain, in a built-in manner not only the first and second principle but also the well defined possibility to recover U from F as before. In the case of continuum mechanics, V must be replaced by the deformation tensor, as we shall see later on, which is a function of the first order derivatives of the *actual* (Euler) position x at time t with respect to the *initial* (Lagrange) position x_0 at time t_0 . Accordingly, the idea of Helmholtz has been to compare the relations $L \rightarrow H$ and $F \rightarrow U$ and to notice that they became indeed similar if one sets $L = -F$ and $\dot{q} = T$ for a certain q . However, despite many attempts [4] [10], today nobody knows any variable q such that its derivative with respect to time should be the absolute temperature T of the system under study.

Of course, *one must not confuse geometry and physics* and we now discuss a very recent tentative by J. Kijowski and collaborators [8] [9] [10]. The basic idea is to use an Eulerian picture rather than a Lagrangian one by inverting the formula $x = f(x_0, t)$ describing the motion of a particle from a reference position x_0 at time t_0 into $x_0 = g(x, t)$. As an expression of the form $t_0 = h(x, t)$ is of no influence on the motion (trajectory, speed, mass per unit volume) the author decides, in order to fulfill the Helmholtz analogy, to *choose* a new variable, say τ , such that $\frac{d\tau}{dt} = \beta T$ with a constant β on the following *purely phenomenological* basis. Suppose the fluid is composed of molecules with mass m , moving chaotically (*microscopic aspect*) around the trajectories of the fluid (*macroscopic aspect*). We know from statistical mechanics that the kinetic energy of this motion with speed v relative to the rest frame is $\frac{3}{2}kT = \frac{1}{2}mv^2$ where k is the Boltzmann constant. Accordingly, the corresponding relativistic proper time retardation is

$$\tau = t \left(1 - \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \right) \simeq \frac{1}{2} \frac{v^2}{c^2} t = \frac{3kT}{2mc^2} t = \beta t.$$

Unhappily, as we shall see later on, while the structure of space time is kept from (x_0, t_0) to (x, t) , the passage to (x, τ) cuts down any possibility to keep the coherence with the mathematical model for elasticity discovered by the brothers E. and F. Cosserat on the basis of new mathematics when *the source* (initial) *space-time and target* (final) *space-time must be identical*.

We now arrive at the work done by Lippmann that we present in a modern setting while changing slightly the notations. The basic idea

is to compare two kinds of conceptual ("Gedanken" in German!) experiments, namely a Carnot cycle for a steam engine working between the absolute temperatures T_1 and T_2 with $T_2 > T_1$ on one side, and a cycle of charge and discharge of a spherical condenser (capacitor) of radius r , say a soap bubble, moving in between two plates at constant electric potentials V_1 and V_2 with $V_2 > V_1$ on the other side.

In the first case, let the system receive the heat $Q_2 > 0$ from the hot source and the heat $Q_1 < 0$ from the cold source through corresponding isothermal evolutions, while receiving the work $W < 0$ from the surroundings in a cycle completed by two adiabatic evolutions. The vanishing of the cycle integral :

$$\oint \frac{\delta Q}{T} = \oint dS = 0$$

coming from the second principle of thermostatics leads to the *Clausius formula* [11] :

$$\frac{Q_1}{T_1} + \frac{Q_2}{T_2} = 0.$$

Now, the vanishing of the cycle integral :

$$\oint (\delta W + \delta Q) = \oint dU = 0$$

coming from the first principle of thermostatics leads to the relation :

$$W + Q_1 + Q_2 = 0.$$

Therefore we obtain :

$$\text{efficiency} = \frac{|W|}{|Q_2|} = \frac{-W}{Q_2} = \frac{Q_1 + Q_2}{Q_2} = \frac{T_2 - T_1}{T_2} > 0$$

and we discover that the maximum theoretical efficiency of such a steam engine only depends on T_1 and T_2 .

In the second case, things are quite more subtle. Recalling the formula $q = CV$ relating the charge q to the potential V of a condenser with $C = 4\pi\epsilon_0 r$ for a sphere of radius r , the electrical energy should be

$$E = \frac{1}{2}CV^2 = \frac{1}{2} \frac{q^2}{C} = \frac{1}{2}qV.$$

Whenever C remains constant (care!) the exchange of work done by the sources should be $\delta W' = Vdq$ because, by definition, sources are at constant potential. In that situation only we have :

$$dE = qdV = Vdq = \delta W'.$$

The situation is *completely different* in the present experiment because C now depends on r and we do not believe that neither Lippmann [14] [17] nor Adler [1] were very conscious about this fact. Let us suppose that the bubble receives the work $W'_2 > 0$ from the source at potential V_2 for having its charge changing at constant potential V_2 and similarly the work $W'_1 < 0$ from the source at constant potential V_1 for having its charge changing at constant potential V_1 , while receiving the (mechanical) work $W < 0$ from the surroundings for changing C in a cycle where the geometry of the system may change (change of radius, distance, ...). The problem is now to construct the cycle in order to be able to copy the procedure used for thermostatics. In the evolution at constant potential we have $\delta W' = Vdq$, as already said, and therefore, comparing with $\delta Q = TdS$, *the remaining evolution must be at constant charge*, a situation happily realized in the experiment proposed by Lippmann, during the transport of the bubble from one plate to the other. Lippmann first notices that the conservation of entropy now becomes the conservation of charge and the vanishing of the cycle integral :

$$\oint \frac{\delta W'}{V} = \oint dq = 0$$

brings the relation :

$$\frac{W'_1}{V_1} + \frac{W'_2}{V_2} = 0$$

analogous to the Clausius formula.

The reader must not forget that such a result, which looks like elementary in 1996, was not so evident in 1876 and Lippmann is the first to have quoted, in the precise mathematical language of cyclic integrals, the principle of conservation of charge, called by himself "*Principe de conservation de l'électricité*" or "*Second principe de la théorie des phénomènes électriques*" as becomes evident from the comparison with Clausius formula.

In a letter to Nature [30] Silvanus P. Thompson required a priority for such a principle but, after the Lippmann's answer in [15], acknowledged the priority of Lippmann in a courteous second letter [31]. Similarly, W.E. Ayrtton and J. Perry claimed for the priority in [3] but Lippmann disproved their claim in [16].

Taking into account the expression $\delta W' = Vdq$ already introduced, we have now, if we allow C to vary (through r in our case), the formula :

$$dE = -\frac{1}{2}V^2 dC + Vdq = \delta W + \delta W'$$

if we express E as a function of C and q . In our case $\delta W = -2\pi\varepsilon_0 V^2 dr$ and the relation $q = CV$ plays the role of the relation $PV = RT$

existing for a perfect gas. Copying the use of the first principle of thermostatics, the vanishing of the cycle integral :

$$\oint \delta W + \delta W' = \oint dE = 0$$

similarly leads to the relation :

$$W + W'_1 + W'_2 = 0.$$

Therefore we obtain :

$$\text{efficiency} = \frac{|W|}{|W'_2|} = \frac{-W}{W'_2} = \frac{W'_1 + W'_2}{W'_2} = \frac{V_2 - V_1}{V_2} > 0$$

and we discover that the maximum theoretical efficiency of such an electric (rather electrostatic) engine only depends on V_1 and V_2 .

One must notice the formula :

$$dE = \frac{1}{2}V^2 dC + qdV$$

if we express E as a function of C and V . Also the analogue of the free energy should be $E - qV = -E$ expressed as a function of C and V . Hence *it is not evident, at first sight, to know whether the more "geometric" quantity is q or V .*

Of course, all the results about reversibility and irreversibility or the impossibility of any perpetual motion became similar to the corresponding ones in thermostatics and are also examined by Lippmann in the same reference [14].

Finally, the analogy between T and V in the corresponding "second principles" is clear and constitutes the Mach-Lippmann analogy in the following board

| THERMOSTATIC | | ELECTROSTATIC |
|----------------------|---|--------------------|
| absolute temperature | ↔ | electric potential |
| entropy | ↔ | charge |
| heat exchange | ↔ | source "work" |

The reader may find strange that T which is just defined up to a change of scale because of the existence of a reference absolute zero [21] should be put in correspondence with V which is defined up to an additive constant. In fact, the formula for the spherical condenser (Gauss theorem) is only true if the potential at infinity is *chosen* to be zero, as a zero charge on the sphere is perfectly detectable by counting the number of electrons on the surface.

Eugene Cosserat (1866-1931), student at Ecole Normale Supérieure in 1883, has been Professor of differential geometry at the University of Toulouse in the spirit of G. Darboux and, as an astronomer, became head of Toulouse observatory in 1908.

Between 1895 and 1910, the two brothers published together a series of Notes in the Comptes Rendus de l'Académie des Sciences de Paris and long Notes in famous textbooks or treatises [5] [6] on the mathematical foundations of elasticity theory [29].

Their main achievement has been the full solution of the following challenge : It is possible to exhibit all the concepts and formulas to be found in *elasticity theory* (deformation/strain tensor, compatibility conditions, stress, stress equations, constitutive relations, ...) just by knowing *group theory*, more precisely the group of rigid motions (3 translations + 3 rotations) of ordinary 3-dimensional space.

Of course any engineer knows that *elasticity, heat and electromagnetism*, though being quite different theories at first sight, are organized along the same scheme and cannot be separated because of the existence of three couplings.

1) **THERMOELASTICITY** (Elasticity/Heat) : When a bar of metal is heated, its length is increasing and, conversely, its length is decreasing when it is cooled down. It is a perfectly *reversible phenomenon*.

2) **PIEZOELECTRICITY, PHOTOELASTICITY** (Elasticity/Electromagnetism) : When a crystal is pinched between the two plates of a condenser, it produces a difference of potential between the plates and conversely, in a purely reversible way. Piezoelectric lighters are of common use in industry.

Similarly, when a transparent homogeneous isotropic dielectric (like "altuglass") is deformed, piezoelectricity cannot appear but the index of refraction becomes different along the three orthogonal proper directions common to both the strain and stress tensors. Here we recall that a material is called "*homogeneous*" if a property does not depend on the point in the material and it is called "*isotropic*" if a property does not depend on the direction in the material. Accordingly, a light ray propagating along one of these directions may have its electric field decomposed along the two others and the two components propagate with different speeds. Hence, after crossing the material, they recombine with production of an interference pattern a fact leading to optical birefringence. Such a property has been used in order to get information on the stress inside the material, say a bridge or a building, by using reduced transparent plastic models. This phenomena was discovered by Brewster in 1815 but the phenomenological law was proposed independently by F.E. Neumann and J.C. Maxwell in 1830.

Until recently one used to rely on the mathematical formulation proposed by Pöckels in 1889 but much theoretical can be found today in the literature. The idea is to make the constitutive law of an homogeneous isotropic dielectric $\vec{D} = \epsilon \vec{E}$ where \vec{D} is the electric induction and $\epsilon = \epsilon_0(1 + \chi)$, ϵ_0 being the vacuum value (universal constant) of the dielectric constant, is such that *the dielectric susceptibility χ now depends on the deformation (or stress) tensor in each direction*. Keeping the constitutive relation $\vec{H} = \frac{1}{\mu} \vec{B}$ where \vec{H} is the magnetic induction and $\mu = \mu_0$ the vacuum value (universal constant) of the magnetic constant, as we have no magnetic polarization in the medium, it is well known that $\epsilon_0 \mu_0 c^2 = 1$, that is $\epsilon \mu c^2 = n^2$ where n is the index of refraction and thus $n^2 = (1 + \chi)$ leading to the Maxwell-Neumann formula :

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \frac{k\lambda}{cC}$$

where σ_1, σ_2 are two eigenvalues of the symmetric stress tensor along directions orthogonal to the ray, k is a relative integer fixing the lines of interference, λ is the wave length, e is the thickness of the transparent beam and c is the photoelastic constant of the material. This is a perfectly *reversible phenomenon* and we can say in a word that *deformation has broken down the symmetry* (homogeneity and isotropy).

3) THERMOELECTRICITY (Heat/Electromagnetism) : We have already spoken about this coupling which, nevertheless, can only be understood today within the framework of the phenomenological *Onsager relations* [20] for *irreversible phenomena*.

Hence we discover that the Mach-Lippmann analogy must be set up in a clear picture of the analogy existing between elasticity, heat and electromagnetism that must also be coherent with the above coupling.

Surprisingly, following the brothers Cosserat, we shall discover that the key tool that will provide a geometric answer is *group theory* [24] [25]. Before entering into more mathematics, we shall try to convince the reader of the novelty of this approach, even at a basic level, by showing out that textbooks of elasticity, heat and electromagnetism have corresponding chapters. For this, we shall make a table of correspondence amplifying the one proposed by Lippmann which is only part of line I :

| CHAPTER | ELASTICITY | HEAT | ELECTROMAGNETISM |
|---------|--------------------------|---------------|--------------------|
| I | DISPLACEMENT | TEMPERATURE | POTENTIAL |
| II | DEFORMATION | GRADIENT | FIELD |
| III | COMPATIBILITY CONDITIONS | ROTATIONAL | FIELD EQUATIONS |
| IV | STRESS | HEAT FLUX | INDUCTION |
| V | STRESS EQUATIONS | HEAT EQUATION | INDUCTION EQUATION |
| VI | HOKE LAW | FOURIER LAW | MINKOWSKI LAW |

One additional chapter is usually added at the end of advanced textbooks to prove that each column comes from a variational procedure. Constitutive laws establish *in each column* a linear relation between the objects of line IV (induction) and the corresponding objects of line II (field).

If ε (not to be confused with the electric constant) is the (small) deformation tensor expressed from the displacement $\vec{\xi}$ through the formula $\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2}(\partial_i \xi_j + \partial_j \xi_i)$ it satisfies $\frac{n^2(n^2 - 1)}{12}$ compatibility conditions, in particular $\partial_{11}\varepsilon_{22} + \partial_2\varepsilon_{11} - 2\partial_{12}\varepsilon_{12} = 0$ for the case $n = 2$ of a plane deformation. If σ is the stress tensor, the Hooke law for an homogeneous isotropic medium becomes :

$$\sigma = \lambda \operatorname{tr} \varepsilon \operatorname{id} + 2\mu \sigma$$

where id stands for the identity matrix, $\operatorname{tr} \varepsilon$ is the trace of ε , sum of the diagonal terms and (λ, μ) are the two Lamé constants. For example, a bar of length L and section S has its length increased by ΔL under a traction F along the relation

$$\frac{F}{S} = E \frac{\Delta L}{L} \quad \text{with} \quad E = \frac{\mu(3\lambda + 2\mu)}{\lambda + \mu}.$$

If \vec{q} is the heat flux, the Fourier law for a homogeneous isotropic medium is

$$\vec{q} = k \vec{\nabla} \cdot T.$$

Finally, the intrinsic Minkowski law allows to combine together :

$$\vec{H} = \frac{1}{\mu} \vec{B}, \quad \vec{D} = \varepsilon \vec{E}$$

in a space-time formulation [22].

Extending the space (x^1, x^2, x^3) or (x, y, z) to space-time $(x^1, x^2, x^3, x^4 = ct)$ as before, the speed is now extended from (v^1, v^2, v^3) to

(v^1, v^2, v^3, c) along the derivative with respect to time, with $v/c \ll 1$, while the motion $x = x_0 + \xi(x_0, t)$ is extended to $t = t_0 + cst$ in order to compare “slices” of space at the same “time”. Accordingly the deformation tensor ε which is dimensionless is extended by $\varepsilon_{i4} = \varepsilon_{4i} = \frac{1}{2} \left(\frac{v^1}{c}, \frac{v^2}{c}, \frac{v^3}{c}, 0 \right)$ while the symmetric stress tensor $\sigma^{ij} = \sigma^{ji}$ becomes $\sigma^{ij} - \rho v^i v^j$ (Euler theorem) and is extended by $\sigma_{i4} = -\sigma^{i4} = \rho v^i c$, $\sigma^{44} = \sigma_{44} = -\rho c^2$ where ρ is the mass per unit volume. Neglecting the quadratic term in the speed compared with the linear ones and using the dilatation relation $\rho = \rho_0(1 - \text{tr } \varepsilon)$ where ρ_0 is the value of ρ in the initial position where the body is supposed to be homogeneous, isotropic and unstressed, that is, ρ_0 is supposed to be a constant. The Hooke law is now extended to :

$$\sigma_{i4} = 2\rho_0 c^2 \varepsilon_{i4}, \quad \sigma_{44} + \rho_0 c^2 = \rho_0 c^2 \text{tr } \varepsilon$$

and we suddenly discover that *there is no conceptual difference between the Lamé constants (λ, μ) and the magnetic constant μ (not to be confused with the previous one) on one side (space) or the mass per unit volume ρ and the dielectric constant ε (time) on the other side, all these coupling constants being measured in the reference state in which the body (like vacuum) is homogeneous and isotropic (the index “zero” is omitted for simplicity). This result is coherent “a posteriori” with the analogy existing between the well known formulas for the speed v_T of transverse elastic waves, the speed V_L of longitudinal elastic waves or the speed v of light waves propagating in a homogeneous isotropic medium, as we have indeed :*

$$v_T = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}, \quad v_L = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}}, \quad v = \sqrt{\frac{1}{\varepsilon\mu}} = \sqrt{\frac{1/\mu}{\varepsilon}} = \frac{c}{n}.$$

We now understand that couplings are in fact more general constitutive laws relating together the lines II and IV in the preceding board, by taking into account the tensorial nature (*Curie principle*) of the various terms involved.

It finally remains to “put into a single basket”, so to speak, the content of the board just quoted. For this we notice that the left part of line I, namely the displacement, has something to do with geometry, namely with translation and thus with group theory, while line V has as many equations as the number of corresponding quantities in line I because their respective variation is used in a contracted tensorial form in order to express a kind of “virtual work”. This is particularly true in the first column where the right member of the stress equations $\partial_i \sigma^{ij} = f^j$ are density of force, like gravitation. (The reader not so familiar with continuum mechanics must just imagine, when he looks

at a suitcase on the ground, that *the only way* to know whether it is heavy or not is ... to lift it up). This is not so evident in the third column where one has to contract the density of current (charge) with the magnetic (electric) potential in the variational formulation of Maxwell equations.

Also, as the Mach-Lippmann analogy (thermoelectricity) only appears in the first (second) line of the second and third columns, the link with the first column is not evident at first sight (the reader may try to imagine any link before reading the end of this essay !)

The key idea of E. and F. Cosserat has been to prove that *the first column only depends on group theory*, at least as far as concepts and equations are concerned because the Lamé constants *must* be measured by means of experiments. We now sketch this result with the minimum of mathematics. However, the reader must be aware that, before we gave the solution in [24] [27] for the first time, many people had already been convinced that a kind of “*secret*” was hidden in the book [7] as no classical mathematics like tensor calculus could explain the content.

The basic motivation lies at the founding level of continuum mechanics. Indeed, if we order the components ε_{ij} of the deformation tensor with $i \leq j$ and write down the variation of the free energy, we get :

$$F = \int_V \varphi(\varepsilon_{i \leq j}) dV \Rightarrow \delta F = \int_V \frac{\partial \varphi}{\partial \varepsilon_{i \leq j}} \delta \varepsilon_{i \leq j} dV$$

with $\delta \varepsilon_{ij} = \frac{1}{2}(\partial_i \delta \xi_j + \partial_j \delta \xi_i)$. Setting

$$\sigma^{i \leq j} = \frac{\partial \varphi}{\partial \varepsilon_{i \leq j}}$$

we obtain the classical relation :

$$\delta F = \int_V \sigma^{ij} \partial_i \delta \xi_j dV = - \int_V \partial_i \sigma^{ij} \delta \xi_j dV + \text{surface integral}$$

leading after integration by part to the stress equation $\partial_i \sigma^{ij} = f^j$ *only if we suppose that the stress is a symmetric tensor*, a result not evident at first sight as it is *proved* in textbooks, and *not postulated*, by considering equilibrium of torsors through the momentum with aspect to the origin of the frame. For example, if we have also :

$$\partial_i (x^1 \sigma^{i2} - x^2 \sigma^{i1}) = x^1 f^2 - x^2 f^1$$

we obtain at once $\sigma^{12} - \sigma^{21}$ and thus the three equations $\sigma^{ij} - \sigma^{ji} = 0$ when $n = 3$. Hence, if we start elasticity theory with the only concept of deformation, *we cannot recover all the properties of the stress*, and

in particular the last 3 equations. But if we start only with the non-symmetrical expression $\varepsilon_{ij} = \partial_i \xi_j$, we can recover the stress equation but the torsor equilibrium cannot be taken into account because the group background is totally missing. Meanwhile, the reader must keep in mind that the classical way to exhibit the deformation is to construct expressions of the displacement and its first derivatives invariant under translation and rotation, therefore called *differential invariant* of the group (the reader may ply the book he/she is reading and then carry it around by translation and/or rotation to see that no change of form is involved).

The first key idea to escape from this dilemma is to gauge the underlying group of transformations, that is to transform each constant parameter into a function.

For the translation $x = x_0 + a$ with $a = \text{cst}$, we obtain $x = x_0 + \xi(x_0)$ and this is just the concept of displacement (there is also the deep hidden reason for not using $x = f(x_0)$). The time t may also enter as a parameter and we can gauge the general rigid transformation $x = Ax_0 + B$ where A is an orthogonal matrix (rotation) and B is a vector (translations), just by setting $x = A(t)x_0 + B(t)$, which is just the way to describe the motion of a rigid body. However, *gauging the rotations as functions on space is not accessible to intuition and new mathematics must be used in place of common sense.*

The second key idea is to construct from these new functions and their first derivatives convenient differential invariants.

For this, if G is a *Lie group* manifold, the parameters of the group are represented by the coordinates of a point on G . By definition, to gauge G over a manifold X is to give a map $a: X \rightarrow G: x \mapsto a(x)$. *This procedure will give the potential $a(x)$ in line I of the board.* Accordingly, $x + dx \mapsto a(x + dx) = a(x) + da$ as a point of G close to a . Comparing with the inverse a^{-1} of a under the group law, we obtain a vector $A = a^{-1}da$ lying in the tangent space of G at the identity $e = a^{-1}a = aa^{-1}$, which is denoted by \mathcal{G} and called the *Lie algebra* of G [2] [25]. In fact the field $A = (A_i^c(x)dx^i)$ can be considered as a map from the tangent space $T = T(X)$ of X (with index $i = 1, \dots, n = \dim X$) to \mathcal{G} (with index $c = 1, \dots, \dim G$), that is to say as an element of $T^* \otimes \mathcal{G}$, also called a 1-form with value in the Lie algebra. *This procedure will give the field in line II of the board.* We check that, if $b \in G$ is a fixed point (not depending on x), we have :

$$(ba)^{-1}d(ba) = (a^{-1}b^{-1})(b da) = a^{-1}da$$

and A can be considered as a basis of differential invariants under the action of G . Moreover, we obtain successively for the variation :

$$\delta A = (\delta(a^{-1}))da + a^{-1}d\delta a$$

$$\begin{aligned}
&= -a^{-1}\delta a a^{-1}da + a^{-1}d\delta a \\
&= a^{-1}(\delta a d(a^{-1}))a + a^{-1}((d\delta a)a^{-1})a \\
&= a^{-1}(d(\delta a a^{-1}))a \\
&= Ad(a)(d(\delta a a^{-1}))
\end{aligned}$$

by introducing the *adjoint action* of \underline{a} as a linear map $Ad(a)$ of \mathcal{G} depending on \underline{a} [2] [25]. Hence we obtain :

$$\begin{aligned}
F = \int_V \varphi(A) dV \Rightarrow \delta F &= \int_V \frac{\partial \varphi}{\partial A} Ad(a) d(\delta a a^{-1}) dV \\
&= \int_V \mathcal{A}_\tau^i \partial_i \lambda^\tau dV \\
&= - \int_V (\partial_i \mathcal{A}_\tau^i) \lambda^\tau dV + \text{surface integral}
\end{aligned}$$

if we set $\delta a a^{-1} = (\lambda^\tau)$ as a vector in \mathcal{G} . Hence there are as many *induction equations* :

$$\partial_i \mathcal{A}_\tau^i = f_\tau$$

as the number of parameters of the group. *This procedure will furnish the induction equations in line V of the board in a coherent way with the line I.*

The reader not familiar with Lie group theory may just keep in mind this last remark and notice, in particular, that the above result allows to recover *all* the equations of torsor equilibrium.

As an example of the usefulness of the previous techniques, let us consider the *motion* of a rigid body $x = A(t)x_0 + B(t)$. Differentiating with respect to time, we get the *speed* $\dot{x} = \dot{A}(t)x_0 + \dot{B}(t)$. Finally, projecting it onto a frame fixed inside the body, we find $v = A^{-1}\dot{A}x_0 + A^{-1}\dot{B}$ and the kinetic energy will therefore be a quadratic function of $A^{-1}\dot{A}$ and $A^{-1}\dot{B}$ only, as before.

The third key idea is to use the action of the group G on X which did not appear in the previous construction. Let us consider an action :

$$X \times G \rightarrow X: (x, a) \mapsto y = ax = f(x, a)$$

and differentiate it successively with respect to x :

$$y^k = f^k(x, a), y_i^k = \partial_i f^k(x, a), y_{ij}^k = \partial_{ij} f^k(x, a), \dots$$

while introducing as many new coordinates denoted symbolically by y_q if we differentiate up to order q and transforming like the corresponding derivatives of a map $f: X \rightarrow X$. Such coordinates will be called *jet coordinates* [25]. Differentiating a sufficient number q of times, we can eliminate the parameters and get equations among x and the jet

coordinates only up to order q , denoted symbolically by $\Phi(x, y_q) = 0$. Replacing the jet coordinates by a transformation $y = f(x)$ and its various derivatives up to order q , we obtain a system of partial differential equation defining a *Lie pseudogroup* of transformations along the ideas of S. Lie [12] [24]. However gauging G and using $a(x)$ instead of a constant \underline{a} , we obtain the functions :

$$f^k(x) = f^k(x, a(x)), f_i^k(x) = \partial_i f^k(x, a(x)), f_{ij}^k(x) = \partial_{ij} f^k(x, a(x)), \dots$$

but now, in general, the components :

$$\partial_i f^k(x) - f_i^k(x), \partial_i f_j^k(x) - f_{ij}^k(x), \dots$$

of the *Spencer operator* are different from zero unless $a(x) = a = \text{cst}$ [12] [23] [24].

The simplest example is provided by the affine transformations :

$$y = ax + b \Rightarrow y_x = a \Rightarrow y_{xx} = 0$$

with specific notation for $n = 1$ and now :

$$f(x) = a(x)x + b(x), f_x(x) = a(x), f_{xx}(x) = 0$$

while, conversely :

$$a(x) = f_x(x), b(x) = f(x) - x f_x(x).$$

We obtain therefore :

$$\partial_x f(x) - f_x(x) = x \frac{\partial a(x)}{\partial x} + \frac{\partial b(x)}{\partial x}, \partial_x f_x(x) - f_{xx}(x) = \frac{\partial a(x)}{\partial x}$$

and check at once the above claim.

It remains to substitute the $f_q(x)$ in place of the $a(x)$ for a convenient q , in the variational calculus and to vary them now in order to obtain similarly induction equations which are equivalent linear combinations of the preceding ones but of a more geometric nature as they only involve indices ranging from 1 to $n = \dim X$.

It is rather astonishing that, in 1975, if Spencer had asked a student to write down the content of the book [12] in the very specific case of ordinary space with $n = 3$, while using the group of rigid motions, the student should have found *line after line*, all the formulas that can be found in the book [7] written by E. and F. Cosserat in 1909 and such a recovery is explicitly done in [24].

Now we are sure to have the “*machine*”, indeed the “*secret*” of [7], explaining fully the first column of the board; it just remain to count the number of objects appearing equally in lines I and V of the board

to have a hint about the possible group candidate for describing the full board. Keeping in mind that, in space-time, there are 4 translations $\vec{\xi}$ and 6 rotations $\vec{\omega}$ (3 space rotations + 3 Lorentz transformations), all the variations that can be found in the engineering calculus leading to finite element computations (MODULEF library for example) are :

$$\underbrace{\delta\vec{\xi}, \delta\vec{\omega}}_{\text{elasticity}}, \quad \underbrace{\delta T}_{\text{heat}}, \quad \underbrace{\delta A_i}_{\text{electromagnetism}}$$

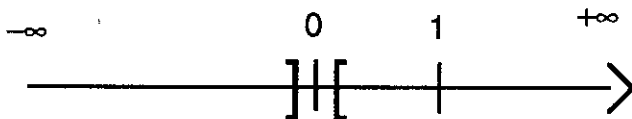
counting all together, we get :

$$4 + 6 + 1 + 4 = 15.$$

The solution to the dream of Mach, Lippmann, Helmholtz, Weyl, ... is thus given by exhibiting the so-called *conformal group* of space-time that preserves the Minkowski metric

$$ds^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2 - c^2 dt^2$$

up to a non-vanishing *function factor*. One can prove indeed that such a Lie group of transformations has 15 parameters, is the biggest group of invariance of Maxwell equations in vacuum and contains in particular the dilatation $x^i \rightarrow a x^i$ for $i = 1, 2, 3, 4$ which is not accessible to intuition. Gauging the connected component $[0, +\infty[$ of the identity below



just explains why *there must be a zero lower bound in the measure of absolute temperature*.

This result clarifies the Helmholtz analogy within jet theory. Indeed, if T is identified with the inverse of a first jet of dilatation by setting $T(x) f_i^k(x) = \delta_i^k$, we may find among the fields the expression $T \frac{\partial t}{\partial t_0}$ when the medium is at rest. Of course $\frac{\partial t}{\partial t_0} = 1$ as we already saw but variation does not commute with evaluation. Hence T behaves like the derivative of a function without being such a proper derivative and we refind exactly the definition of a jet coordinate. Such a result should lead in the future to revisit entirely the foundations of thermodynamics [25].

The additional 4 transformations are highly nonlinear and we understand that, contrary to E. and F. Cosserat who succeeded with

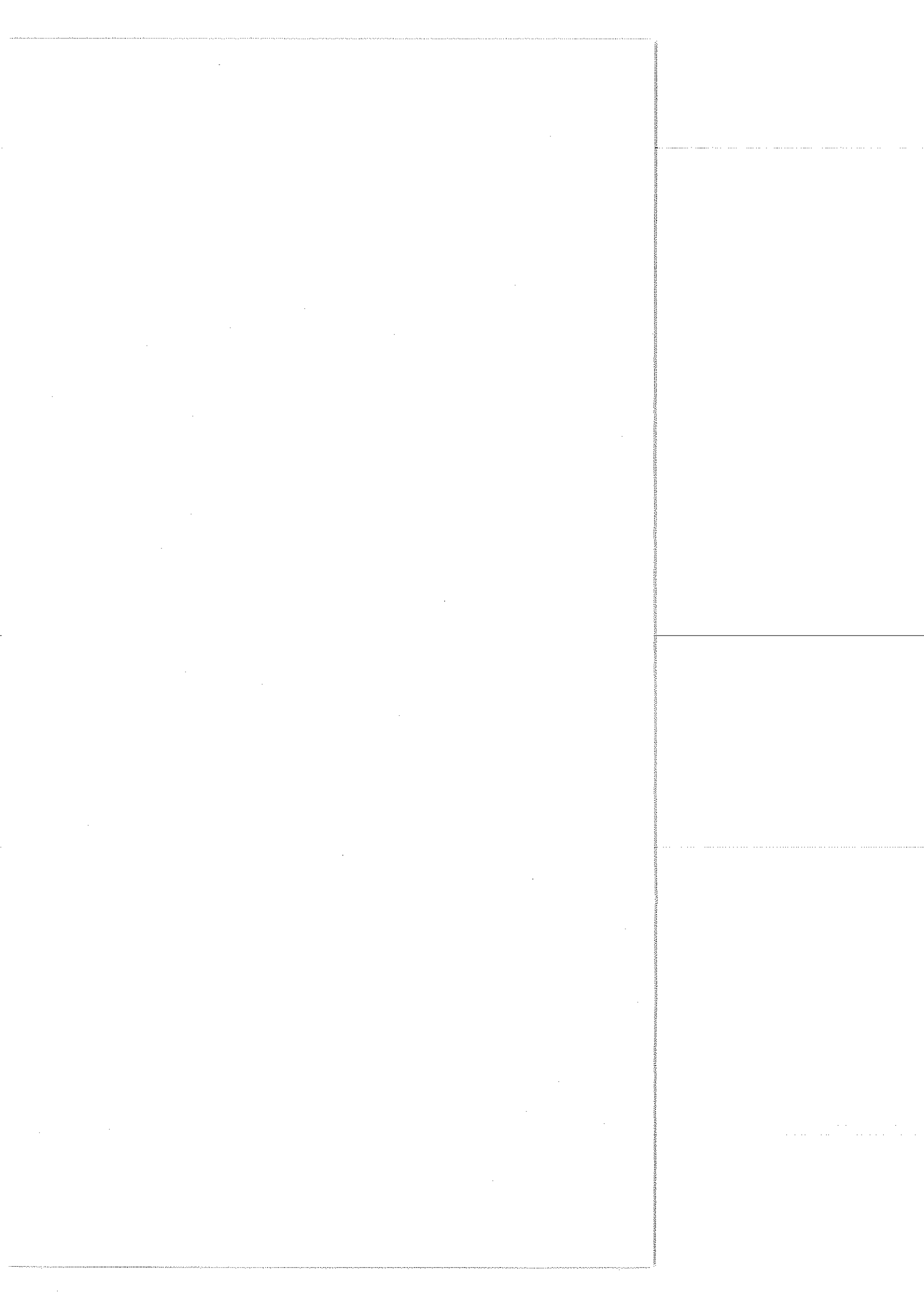
linear transformations, H. Weyl did not succeed in relating electromagnetism with the conformal group in the beautiful reference [32], *though the idea was a ingenious one*, simply because he could not use in 1920 a mathematical tool only created in 1970 !

The reader may now understand that such a geometric unification was indeed the dream of E. and F. Cosserat who refer many times explicitly to the work of Lippmann ([6] p. 558; [7] p. 147, 211).

We hope to have shown in this essay how new differential geometric methods can confirm and expand the pioneering work of Gabriel Lippmann towards the striking unification of elasticity, heat and electromagnetism.

References

- [1] F.W. Adler, *Über die Mach-Lippmannsche Analogie zum zweiten Hauptsatz*, *Annalen der Physik und Chemie*, 22, 1907, p. 587-594.
- [2] V. Arnold, *Méthodes mathématiques de la mécanique classique*, appendice 2, Editions MIR, Moscou, 1976, 318 p.
- [3] W.E. Ayrton, J. Perry, *La lumière électrique*, Paris, 1881, p. 266.
- [4] L. de Broglie, *Thermodynamique de la particule isolée*, Gauthier-Villars, Paris, 1964, 125 p.
- [5] O.D. Chwolson, *Traité de physique*, Hermann, Paris, 1914 (In particular III, 2, p. 537 + III, 3, p. 994 + V, p. 209).
- [6] E. and F. Cosserat, *Note sur la théorie de l'action euclidienne*, in P. Appell, *Traité de mécanique rationnelle*, t. III, Gauthier-Villars, Paris, 1909, p. 557-629.
- [7] E. and F. Cosserat, *Théorie des corps déformables*, Hermann, Paris, 1909, 226 p.
- [8] A. Gornicka, J. Kijowski, A. Smolski, *Hamiltonian theory of self-gravitating perfect fluid*, *Physical Review D*, 41, 6, 1990, p. 1875-1884.
- [9] J. Jezierski, J. Kijowski, *Thermodynamics as a field theory in Hamiltonian thermodynamics*, P. Salomon editor, Taylor and Francis Publ. Company, 1991.
- [10] J. Kijowski, W.M. Tulczyjew, *A symplectic framework for field theories*, Springer lecture notes in physics 107, Springer-Verlag, Berlin, 1979.



Gabriel Lippmann et le Luxembourg

Jos. A. Massard
Centre universitaire de Luxembourg

L'un des premiers ouvrages luxembourgeois à parler de Lippmann a été l'impressionnante bibliographie compilée par le curé Martin Blum (1845-1924). Dans le volume I, publié par "bribes" entre 1902 et 1908, douze écrits de Lippmann ont été recensés par le bibliographe, parmi eux la thèse inaugurale (*"Relation entre les phénomènes électriques et capillaires"*, (1875)¹, le cours de thermodynamique professé à la Sorbonne (1886) le cours d'acoustique et d'optique professé à la Sorbonne (1888), les *"Leçons d'acoustique et d'optique"* en 2 volumes (1889)², des titres d'articles publiés dans les Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences: *"La photographie des couleurs"* (1891), *"Sur la photographie des couleurs"* (1892), *"Photographies colorées du spectre sur albumine et sur gélatine bichromatées"* (1892), *"Sur la théorie de la photographie des couleurs simples et [composées]"*³ par la méthode interférentielle" (1894). Enfin, Blum cite encore deux ouvrages préfacés par Lippmann, dont *"La photographie des couleurs"* (Paris, 1899) par L.P. Clerc. La liste de Blum s'arrête là.

La très courte notice biographique que Blum a placée au début de sa note bibliographique nous apprend que Jonas-Ferdinand-Gabriel Lippmann est professeur à la Sorbonne et qu'il est né à Bonnevoie, le 16 août 1845. Dans ses "Kalennerblieder" Friedrich (1980) indique la même date – qui est correcte –, alors que dans d'autres publications il confond le jour de la naissance avec celui de la déclaration de celle-ci,

¹Blum (1902ss) indique l'année 1876, alors que chez Lebon (1911) nous lisons 1875.

²Blum (1902ss) indique l'année 1890, alors que chez Lebon (1911) nous lisons 1889. Ce cours, de même que les deux précédents, a bien été professé par Lippmann, mais la rédaction de ces ouvrages représente en fait le travail d'autres personnes (pour plus de précisions voir Lebon 1911: 21-22).

³Dans le texte de Blum: "comparées" au lieu de "composées".

qui a eu lieu le 17 août 1845 (Friedrich 1979, 1984a,b, 1987, 1989). Bové (1989) fait la même erreur. Remarquons encore que les ouvrages de référence font souvent naître Lippmann à Hollerich. René Grégorius (1984b) l'a constaté pour le Petit Larousse; il existe de multiples autres exemples: Quillet (1958), Encyclopaedia Britannica (1969), Dictionary of Scientific Biography (Hopley 1973), Brockhaus Enzyklopädie (1990), The Cambridge Biographical Encyclopaedia (Crystal 1994). L'Encyclopaedia Universalis (1996) et le "Dictionnaire des inventeurs et inventions" des Éditions Larousse (Galiana & Rival 1996) écrivent "Hallerich" au lieu de "Hollerich".

Nous verrons plus loin que l'origine de la confusion Hollerich/Bonnevoie est probablement à rechercher chez un Luxembourgeois, à savoir Émile d'Huart (1906) qui a entraîné dans sa foulée Lebon (1911); mais il n'est pas à exclure que Lippmann lui-même ait eu l'habitude d'indiquer comme lieu de naissance la commune plutôt que la localité.

Car Hollerich, c'est bien la *commune* où Lippmann est né. Au 19^e siècle, les villages de Hollerich et Bonnevoie représentaient deux sections d'une commune indépendante, celle de Hollerich, précisément, qui comportait en outre les sections de Cessange, Gasperich et Merl. Gabriel Lippmann a vu le jour dans la section de Bonnevoie. Citons pour preuve l'acte de naissance établi par le bourgmestre de la commune de Hollerich et reproduit chez Stumper (1962) où nous lisons: "*geboren zu Bonevoie in hiesiger Gemeinde*". L'acte reproduit dans l'article de Grégorius (1984) contient une formulation et une orthographe légèrement différentes, à savoir: "*geböhren zu Boneveg in hiesiger Gemeinde*"; il correspond à la copie de l'acte déposée au tribunal d'arrondissement. En 1920, la commune de Hollerich a renoncé à son indépendance et est devenue partie intégrante de la commune de Luxembourg, dont Bonnevoie constitue depuis un quartier, tout comme Hollerich.

Échos de la séance de l'Académie des Sciences du mois de février 1891

Le "Luxemburger Zeitung" entretenait dans ses colonnes une rubrique appelée "Pariser Brief" (lettre de Paris), dans laquelle il tenait ses lecteurs au courant des principaux événements politiques et culturels se déroulant dans la capitale française. La "lettre" de l'édition du 5 février 1891 comporte parmi diverses autres nouvelles le résumé de la séance de l'Académie des Sciences du 2 février 1891. Celle-ci fut marquée par plusieurs communications. D'abord, celle de Wiener⁴ sur

⁴Otto Heinrich Wiener (1862-1927), physicien allemand. "Il a réalisé des ondes lumineuses stationnaires par interférences de rayons incidents et de rayons réfléchis par une pellicule photographique recouvrant une lentille, expérience qui servit de base à la photographie des couleurs de Lippmann." (Galiana & Rival 1996)

la ressemblance entre les ondes lumineuses et les ondes sonores, puis un exposé de Lippmann qui annonça qu'il avait réussi à reproduire par la photographie non seulement la forme mais aussi les couleurs des objets. Pour preuve il présenta quelques photos et expliqua le procédé qui avait permis de les obtenir :

“Lippmann theilte mit, daß es ihm gelungen sei, bei der Photographie außer der Form auch die Farbe der Gegenstände darzustellen, und zeigte zum Beweise einige Aufnahmen vor, welche durch die Reflexion die natürliche und durchscheinend die Ergänzungsfarbe zeigen. Lippmanns Verfahren ist kein chemisches, sondern ein physikalisches. Die empfangliche Fläche muß durchaus gleichmäßig sein. Die gewählte Platte wird in der dunkeln [sic] Kammer mit der lichtempfindlichen [dans le texte: nichtempfindlichen] Fläche dem zu photographirenden Gegenstande zugewendet. Der lichtempfindlichen Seite gegenüber befindet sich ein Quecksilberspiegel, welcher die Lichtstrahlen zurückwirft und Interferenzerscheinungen hervorruft. Die sonstige Behandlung der Platte ist dieselbe wie bei der gewöhnlichen Photographie. Becquerel bemerkte, auch mit Hilfe von unterchlorsaurem Silber sei es möglich, die Farben mit zu photographiren, dieselben verschwinden aber unter dem Einflusse des Lichts.”

Après la communication de Lippmann, ce fut à Duclaux⁵ de prendre la parole et de présenter ses études sur l'effet du séjour en haute altitude sur la teneur du sang en hémoglobine.

Une conférence devant l'Université populaire de Luxembourg

Dès cette date, le public luxembourgeois était donc au courant de l'invention de Lippmann. En 1892, la Société de Photographie de Luxembourg fit de Lippmann son membre d'honneur (Lebon 1911).

Au début du 20^e siècle, il existait dans la ville de Luxembourg plusieurs sociétés d'amateurs de photographie dont chacune comptait de nombreux adhérents. L'un de ces photographes amateurs était Émile d'Huart (1861-1918), professeur de chimie à l'Athénée de Luxembourg et directeur du Laboratoire de chimie de l'État.

Le 28 janvier 1906 d'Huart fit une conférence sur la photographie des couleurs à la tribune de l'Université populaire de Luxembourg (“Volkshochschule”). Il en profita pour expliquer à son public le procédé photographique de Lippmann. D'Huart connaissait bien Lippmann pour avoir suivi ses cours à la Faculté des Sciences de Paris. Pour les détails biographiques sur ce pionnier de la chimie luxembourgeoise on lira les pages que Mersch (1969) lui a consacrées dans la “Biographie Nationale”.

⁵Pierre Emile Duclaux (1834-1904), physicien et chimiste, fut l'un des principaux collaborateurs de Pasteur et dirigea longtemps l'Institut Pasteur.

Le "Luxemburger Wort" a publié le 30 janvier 1906 un long compte rendu de la conférence du professeur d'Huart et notamment de ses explications au sujet du procédé Lippmann. D'Huart n'a pas caché les difficultés auxquelles se heurtait ce procédé, qui, pour lui, n'étaient pas sans rappeler celles rencontrées à ses débuts par la daguerréotypie: *"Das Stadium, in welchem sich zur Zeit das Lippmann'sche Verfahren befindet, entspricht vollständig dem Stadium der Daguerreotypie. Manche Schwierigkeiten hemmen seine Entwicklung und hindern seine Verbreitung."*

Vers la fin de sa conférence, d'Huart a montré en projection des photographies en couleurs de sa propre production. Il ne ressort pas du contexte s'il s'agissait de photographies basées sur un procédé chimique ou sur le procédé de Lippmann: *"Eine ganze Reihe trefflicher Lichtbilder veranschaulichten den höchst interessanten Vortrag. Den Glanzpunkt desselben bildeten die zum Schlusse in Projektion gezeigten eigenen Aufnahmen des Herrn Vortragenden. Die sehr scharfe Zeichnung der Objekte, der hohe Glanz und die reiche Schattierung der Farben riefen allgemeine Bewunderung hervor. Der gebotene Genuß war ein seltener, da bis jetzt nur wenige guten Farbenbilder angefertigt worden sind."* L'excellente prestation du conférencier fut fortement applaudie par le public.

Un article publié par la section des sciences de l'Institut grand-ducal

Au cours de la même année d'Huart publie une version sans doute amplifiée de son exposé dans les "Archives" de la section des sciences de l'Institut grand-ducal (d'Huart 1906). Il y rappelle l'origine luxembourgeoise de Lippmann et ses propres relations privilégiées avec le grand savant français: *"Monsieur Lippmann n'est pas inconnu à Luxembourg. Il est né en 1845, à Hollerich [sic], aux portes mêmes de la capitale du pays. Mais depuis longtemps la France nous l'a revendiqué, pour le placer au rang de ses premiers et plus grands physiciens. Je me flatte de l'honneur de m'être trouvé parmi ses premiers élèves à l'université de France, où il occupe aujourd'hui encore la chaire de physique."* On remarque que d'Huart affirme que Lippmann est né à Hollerich, sans préciser qu'il parle de la commune et non point de la localité du même nom. Lebon (1911) a repris de larges extraits de l'article de d'Huart dont le paragraphe ci-dessus. C'est donc bien d'Huart qui a probablement induit en erreur les auteurs étrangers (et nombre d'auteurs indigènes) en ce qui concerne le véritable lieu de naissance de Lippmann.

Quoi qu'il en soit, d'Huart a bien expliqué aux Luxembourgeois le principe et l'avantage du procédé de Lippmann par rapport aux procédés antérieurs de photographie des couleurs:

“Un seul procédé [photographique] qui répond à toutes les exigences de la définition est celui de la photochromie interférentielle de Monsieur Lippmann. Monsieur Lippmann en a fait la communication à l'académie des sciences de Paris à la date du 2 février 1891, un demi siècle après que Arago avait fait à la même place l'apologie des résultats brillants de la daguerréotypie.

Jusque-là c'étaient le hasard et les tâtonnements qui présidaient à toutes les découvertes de la photographie. Monsieur Lippmann leur a substitué les méthodes scientifiques du raisonnement. En théorie, le son et la lumière se ramènent à la même cause primordiale: à la vibration qui se propage.

Le son peut être enregistré sur le cylindre du phonographe, pourquoi la possibilité d'être enregistrée d'une manière analogue sur la plaque photographique, n'existerait-elle pas pour la lumière ?

Monsieur Lippmann a démontré qu'elle existe. (...)

Et d'Huart de se lancer dans l'explication des phénomènes physiques à la base du procédé Lippmann, pour conclure de la manière suivante:

“Le procédé Lippmann est, de tous les procédés usités en photographie, le seul qui imprime directement et automatiquement les couleurs naturelles. Il les rend avec une fidélité qui ne pourra jamais être atteinte par aucun des autres procédés, car ceux-ci accordent, comme nous l'avons vu, une part trop large au hasard et au tâtonnement, et la couleur qu'ils donnent est toujours cette couleur matérielle, que l'habile opérateur est parvenu à y placer, d'une manière plus ou moins parfaite, et qui n'a aucun rapport de composition avec les couleurs de la nature. La couleur du cliché Lippmann au contraire, apparaît d'elle-même sur la plaque photographique: elle n'exige pas l'intervention d'une main qui la surveille et la corrige. Elle est immatérielle. Ses reflets charmeurs sont de même origine que ceux du rubis, de l'émeraude, du saphir et de la topaze; ils sont aussi brillants que ceux du diamant et aussi purs que ceux de l'arc-en-ciel.

À la vue d'un cliché Lippmann l'oeil s'arrête fasciné par l'effet enchanteur de toutes ces couleurs mystérieuses et féeriques, qui semblent jaillir des profondeurs de l'image, pour l'illuminer de cet éclat éblouissant et chaud, qu'on ne retrouve, avec une splendeur égale, que dans le feu des plus admirables et des plus précieuses camées de la création.

Issu du raisonnement, le procédé de photochromie Lippmann constitue non seulement une des plus superbes conceptions de l'esprit humain, mais il se révèle surtout comme un exemple frappant de la puissance qui est inhérente à une théorie scientifique, quand celle-ci est appliquée judicieusement à un ordre de faits analogues à ceux qui lui ont donné naissance.

Certes, le dernier mot de la photographie des couleurs n'est pas dit aujourd'hui, mais la phase qu'elle traverse ressemble à s'y méprendre à l'époque daguerrienne de la photographie ordinaire.

Longueur excessive du temps de pose, imperfection du matériel d'opération, insuffisance de la connaissance de tous les éléments techniques du procédé, ignorance au point de vue de la reproduction multiple de l'image, incertitude dans les méthodes d'exécution pratique, fréquence désespérante des insuccès, telle est la série des inconvénients qui, il y a cinquante ans, paralysaient la daguerréotypie et semblaient la condamner à une inertie fatale et invincible; telle est encore la liste des difficultés inéluctables qui aujourd'hui paralysent la photochromie interférentielle de Lippmann, et lui obstruent d'une manière encombrante toutes les voies de son évolution.

La daguerréotypie a trouvé son Prince Charmant, qui l'a conduite à la gloire. Nous savons tous à quel degré imprévu et inattendu de perfection elle a su s'élever.

La photochromie est susceptible de perfection au même titre que la daguerréotypie; l'état de torpeur dans lequel elle se trouve actuellement ne peut être que passager. Comme la Belle au bois dormant elle attend son libérateur!"

Lippmann et la "Revue Luxembourgeoise"

Un compte rendu analytique un peu tardif de la conférence faite par Émile d'Huart en janvier 1906 a été publié en 1907 par la "Revue Luxembourgeoise", l'organe de l'Université populaire de Luxembourg. Il a été rédigé par le jeune professeur de chimie Gustave Faber (1880-1972) et le médecin Mathias Grechen (1857-1919). Ceux-ci nous apprennent que d'Huart avait construit un châssis spécial pour une mise au point mathématiquement exacte des images Lippmann. Plus de doute possible: d'Huart a fait lui-même des photographies réalisées selon le procédé Lippmann, et il les a montrées lors de sa conférence. Faber et Grechen se réjouissent en fin d'article de "la note patriotique" que l'orateur a introduite dans son discours: "Il nous a montré que le grand savant qui a donné à la photographie des couleurs la seule base scientifique qu'elle ait jusqu'à ce jour, est un Luxembourgeois. M. Gabriel Lippmann, nous dit-il, est né aux portes de Luxembourg à Holverich [sic]. Et ceci n'est pas pour nous déplaire. Arrivé aux plus grands honneurs scientifiques que la France, sa seconde patrie, et le monde savant entier peuvent décerner, M. Lippmann a gardé pour sa petite terre natale l'attachement de la première heure, et les Luxembourgeois qui sont venus à ses cours pour se faire initiés aux grands problèmes de la physique, ont trouvé en lui non seulement un maître incomparable, mais encore un protecteur généreux et bienveillant." Ensuite, les auteurs mettent en lumière le soutien accordé par Lippmann à la revue

éditée par l'Université populaire: *"Aussi quand nous l'avons informé de la naissance de notre Revue, nous a-t-il prodigué des encouragements et communiqué les bonnes feuilles du discours inaugural qu'il a prononcé, l'été dernier, comme président de l'Association française pour l'avancement des sciences. Nos lecteurs liront avec plaisir ce beau morceau d'éloquence académique et s'associeront à nous pour exprimer à l'auteur les plus vifs remerciements."*

Et d'ajouter: *"Auparavant, nous reproduirons une silhouette du savant, laquelle a pour auteur l'un de ses collègues à la Sorbonne. Dans la collection de nos fiches, commencée depuis de longues années, nous avons retrouvé ce portrait délicatement retouché; il n'est pas inédit, mais nous estimons que nos amis seront satisfaits de le lire encore une fois."*

L'article en question est sorti de la plume d'Alphonse Berget (1860-1934). Ce physicien français, qui été directeur adjoint du laboratoire de géographie physique à la Sorbonne, est connu pour sa reconstitution de l'expérience du pendule de Foucault, au Panthéon, en 1902. Quant à l'article de Lippmann, il s'agit d'une réflexion sur "La Science et l'Industrie". Les deux articles sont repris dans la bibliographie (Berget 1906, Lippmann 1906).

Théophile Funck-Brentano et Lippmann

Le 23 janvier 1906 est mort à Montfermeil (France) Théophile Funck-Brentano. Né à Clausen (Luxembourg) le 21 août 1830, Funck-Brentano, médecin et philosophe, a été nommé en 1873 chef du service statistique au Ministère des Finances à Paris et professeur à l'École Libre des Sciences Politiques de Paris. Funck-Brentano, le Luxembourgeois ayant reçu les lettres de "Grande Naturalisation française" pour ses services rendus à la France en tant que médecin militaire volontaire sur les champs de bataille de la guerre de 1870/71, et Lippmann, le Français né au Luxembourg, se sont sans doute connus à Paris. En 1896, Funck-Brentano a publié l'ouvrage *"Méthode et principes des sciences naturelles. Introduction à l'étude de la médecine"* dans lequel il cite la découverte de la photographie des couleurs par interférence par Lippmann comme exemple du raisonnement par déduction: *"À différentes reprises, des savants ont cherché la photographie des couleurs au moyen de procédés chimiques sans réussir à les fixer. Monsieur Lippmann en inféra qu'il fallait s'adresser aux procédés physiques. Ce fut une induction concluant du particulier au général. Frappé ensuite des analogies qui existent entre les vibrations sonores et les vibrations lumineuses, il déduisit de l'accroissement des vibrations de l'air produisant des sons déterminés, que l'augmentation d'intensité des vibrations lumineuses pouvait produire des couleurs fixes. Ce fut une déduction imaginaire à l'instar de celle de Cuvier, et qui serait restée*

telle sans la réalisation, par l'expérience, de la fixation des couleurs, c'est-à-dire sans l'invention des appareils, compositions et plaques justifiant l'exactitude de la déduction" (Funck-Brentano 1896). C'est mon collègue Roger Schmit, chargé du cours de philosophie des sciences au Centre universitaire et spécialiste de Franz Brentano, le beau-frère de Théophile Funck-Brentano, qui a attiré mon attention sur cet ouvrage. Il a d'ailleurs fait une brève analyse des idées philosophiques de Funck-Brentano dans un article récent (Schmit 1996).

Lippmann et la section des sciences de l'Institut grand-ducal

En 1907, Lippmann a été admis comme membre honoraire de la section des sciences de l'Institut grand-ducal. Les membres honoraires admis cette année-là ont été particulièrement nombreux; outre Lippmann, il y avait: Benecke⁶, directeur de la Geologische Landesanstalt de l'Alsace-Lorraine, à Strasbourg; Alph. Berget⁷, directeur du Musée océanographique à Paris; Éd. Branly⁸, professeur aux Facultés catholiques de Paris; H. Huchard⁹, docteur, professeur à la Faculté de Médecine de Paris; Désiré Lucas, professeur à la Faculté des sciences du Collège Notre-Dame de la Paix, à Namur; Joh. Reinke¹⁰, docteur, professeur à l'université de Kiel; et deux Luxembourgeois exilés: l'ophtalmologue Jean-Pierre Nuel¹¹, professeur à l'université de Liège (né à Tétange en 1847, naturalisé belge en 1885), ainsi que Léopold van Werveke¹², "Bergrat, Landesgeologe" à Strasbourg (né à Diekirch en 1853) (Anonyme 1908).

⁶Ernst Wilhelm Benecke (1838-1917), né à Berlin, mort à Strasbourg, doctorat à Heidelberg, "Privatdozent" à Heidelberg, professeur à l'université de Strasbourg à partir de 1869, directeur de la "Geologische Landesuntersuchung" d'Alsace-Lorraine, fondateur en 1892 de la "Geologische Landesanstalt" d'Alsace-Lorraine (DBE 1995: 418).

⁷Alphonse Berget (1860-1933), né à Sélestat (Bas-Rhin), géophysicien français, professeur d'océanographie physique (Quillet 1958, vol. A-C).

⁸Édouard Branly (1844-1940), physicien français, inventeur du cohéreur à limaille qui permet la réception de signaux de télégraphie sans fil (T.S.F.), membre de l'Académie des Sciences en 1911 (Galiana & Rival 1996).

⁹Henri Huchard (1844-1910), médecin français, membre de l'Académie de Médecine, éminent cardiologue (Quillet 1958, vol. F-K).

¹⁰Johannes Reinke (1849-1931), botaniste et philosophe (Brockhaus Enzyklopädie 1994).

¹¹Jean-Pierre Nuel (1847-1920), médecin, professeur à l'université de Louvain en 1877, professeur à l'université de Gand en 1880, professeur d'ophtalmologie à l'université de Liège en 1885 (Stumper 1962).

¹²Léopold van Werveke (1853-1933), géologue, nommé fonctionnaire à l'Institut de géologie de Strasbourg en 1887 (abandon de sa nationalité luxembourgeoise et acquisition de la nationalité allemande, l'Alsace-Lorraine étant rattachée à l'époque au "Reich" allemand), "Kaiserlicher Bergrat" en 1903, "Geheimer Bergrat" en 1913, préposé de l'Institut de géologie en 1914, émigration en Allemagne après la fin de la Grande Guerre (Stumper 1962).

L'attribution du prix Nobel

On sait qu'en 1908 l'Académie Royale des Sciences de Suède a décerné le prix Nobel de physique à Gabriel Lippmann "pour sa méthode fondée sur le phénomène de l'interférence, permettant de reproduire photographiquement les couleurs" (Lebon 1911). La remise du prix a eu lieu le 10 décembre 1908 à Stockholm.

Le 11 décembre 1908 deux journaux luxembourgeois, le "Luxemburger Zeitung" et le "Luxemburger Wort", font part de la cérémonie de la remise des prix Nobel. Ils citent les noms des savants honorés tout en insistant qu'il n'y a pas de surprise, étant donné que ces noms ont déjà circulé depuis des semaines. Il s'agit de Frederik Bajer et Klas Pontus Arnoldson (prix Nobel de la paix), Élie Metchnikoff et Paul Ehrlich (médecine), Ernest Rutherford (chimie), Gabriel Lippmann (physique), Rudolf Eucken (littérature). En ce qui concerne Lippmann, les deux quotidiens écrivent O. Lippmann au lieu de G. Lippmann.

Dans le "Luxemburger Zeitung" du 11 décembre 1908 nous lisons en page 3:

"Die Verteilung der Nobelpreise, die gestern in Stockholm und in Christiania erfolgt ist, hat insofern keine Überraschung gebracht, als die Namen der Träger schon seit Wochen genannt wurden. Allerdings liefen daneben noch andere Namen einher, die die Sache verwirrten und nur dann auch richtig sein konnten, wenn man alle Preise halbiert hätte. Tatsächlich sind nur zwei Preise geteilt worden: der Friedenspreis, den das Nobelkomitee des norwegischen Stortings zu vergeben hat, ist dem Leiter der Friedensbewegung in Dänemark, Friederik [sic] Bajer, u. dem Schweden K.P. Arnoldson zugefallen; den Preis für Medizin – der samt den übrigen Preisen von Stockholm aus verteilt wird – erhielten der Leiter des Pasteurschen Instituts in Paris, Professor Metschnikow, und der Direktor des Frankfurter Instituts für experimentelle Therapie, Prof. Paul Ehrlich. Der Preis für Chemie wurde den Prof. E. Rutherford in Manchester, der für Physik dem Prof. [G.]¹³ Lippmann in Paris und der für Literatur dem Prof. Rudolf Eucken in Jena zuerkannt. Jeder der diesjährigen Nobelpreise beläuft sich auf 192 827 Franken."

Le "Luxemburger Wort" annonce la remise des prix Nobel à la une, avec exactement le même texte – les deux journaux luxembourgeois sont de toute évidence clients de la même agence de presse –, sauf que le "Wort" reproduit en entier le texte reçu. Ainsi, nous y apprenons en plus que le lauréat du prix Nobel de la paix, K.P. Arnoldson, est venu en personne à Christiania (ancien nom pour Oslo) et qu'il y a fait un discours au cours duquel il a développé un plan en vue de

¹³dans le texte: O. Lippmann

l'organisation du travail international pour la paix mondiale. Tous les adultes, hommes et femmes, devraient être incités à signer une pétition en faveur de la paix mondiale et exigeant la suppression de l'armement de guerre ainsi que la création d'une force armée commune à tous les pays et ayant pour mission le maintien de l'ordre mondial. (Rappelons que le prix Nobel de la paix est remis en Norvège, alors que les autres prix sont remis en Suède.)

Le "Wort" relève ensuite que tous les lauréats furent présents lors de la remise solennelle des prix, sauf Metchnikoff qui s'était fait représenter par l'ambassadeur russe, le baron von Budberg. Ce fut le roi de Suède lui-même qui leur remit le prix, le diplôme et la médaille d'or. Après la remise des prix, il y eut un dîner de gala avec la participation du prince royal et de la princesse royale. Le chancelier de l'université, le comte Wachtmeister, porta un toast en l'honneur du roi. Le prince royal évoqua la fondation Nobel, alors que le professeur Eucken de Iéna exprima ses remerciements pour la distinction dont il avait été honoré.

Dans son article, le "Wort" évoque la biographie de deux des lauréats dont il publie en plus les portraits: d'abord, le professeur Élie Metchnikoff de l'Institut Pasteur, "*l'un des plus grands biologistes contemporains*", puis le professeur Paul Ehrlich, le "*fondateur de la sérothérapie, à côté de Behring*".

Hommage du "Luxemburger Zeitung"

Dans cette première phase, aucune information particulière n'a été fournie sur Lippmann, ni dans l'un ni dans l'autre journal luxembourgeois. Le lendemain, cependant, le "Luxemburger Zeitung" se rattrape (édition du 12 décembre 1908). Il a réalisé que Lippmann est né au Luxembourg. L'article rappelle quelques détails biographiques le concernant et présente le résumé de l'analyse de l'oeuvre scientifique de Lippmann faite dans le "Chemiker-Zeitung" par le Prof. Dr. R. Schaum de Leipzig. En plus, la cérémonie de la remise des prix est relatée de manière plus exhaustive. Voici le texte intégral de cet article:

"Luxemburg, 12. Dez. Wie unsern Lesern bekannt, wurde am Donnerstag in Stockholm die Nobel-Feier abgehalten. (Der Erfinder des Dynamits Alfred Nobel bestimmte den Ertrag seines Vermögens, 44 Millionen Franken, für wissenschaftliche und humanitäre Zwecke; jährlich werden fünf Preise verliehen für Leistungen auf dem Gebiet der Physik, Chemie, Medizin, Literatur und Friedensbestrebungen. Jeder der diesjährigen Preise belief sich auf nahezu 193 000 Franken).

Unter den diesjährigen Preisträgern befindet sich Gabriel Lippmann, ein geborener Luxemburger, der in Heidelberg studiert hat und seit 1886 Professor der allgemeinen Physik an der Pariser Sorbonne ist.

Jonas Ferdinand Gabriel Lippmann ist geboren am 16. August 1845 in Bonneweg.

Seine wissenschaftlichen Arbeiten beschäftigen sich, wie Prof. Dr. R. Schaum (Leipzig) in der "Chemiker-Zeitung" ausführt, vornehmlich mit dem Gebiet der Elektrizität, für das er in dem Capillarelektrometer eines der wertvollsten Meßinstrumente geschaffen hat. Ferner verdanken wir ihm eine Reihe wichtiger Studien über Capillarität, über thermodynamische Fragen, sowie über gewisse optische Phänomene. Die wissenschaftliche Photographie hat er durch die Erfindung der bekannten Interferenzmethode zur Herstellung farbiger Bilder, durch Untersuchungen über die Verwendung von Lichtfiltern und die Ausarbeitung verschiedener photographischer Meß- und Aufnahmeverfahren bereichert. Von wissenschaftlichen Werken Lippmanns seien sein Lehrbuch der Physik und der Optik, seine Vorlesungen über Thermodynamik und sein Werk über elektrische Maße genannt. In neuester Zeit beschäftigt sich der hervorragende Forscher mit einer ebenso originellen wie kühnen Idee, deren Ausführung zwar erhebliche Schwierigkeiten bietet, in der Hand des äußerst gewandten Experimentators jedoch aller Wahrscheinlichkeit nach bald gelingen wird: er will photographische "Facettenplatten" herstellen, die gewissermaßen das Auge der Insekten nachahmen.

Über die Verteilung der Nobel-Preise wird näher aus Stockholm unterm 10. ds. berichtet:

Im großartig geschmückten, lichtstrahlenden Saale des Konservatoriums ist heute nachmittag, beginnend um 4 Uhr, die Nobel-Feier abgehalten worden. Alles, was die Hauptstadt an hervorragenden Vertretern auf dem Gebiete der Wissenschaften, der Kunst und der Literatur besitzt, ferner Diplomaten, hohe Offiziere und Beamten nebst ihren Damen waren anwesend. Der König, der Kronprinz und die Kronprinzessin, sowie andere Prinzen und Prinzessinnen waren mit großem Gefolge erschienen. Nachdem die Hofkapelle das Vorspiel zu den "Meistersingern" vorgetragen hatte, betrat der Vorsitzende der Nobel-Stiftung, Universitätskanzler Graf Wachtmeister, die Rednerbühne. Er begrüßte den König und hielt dann eine Rede über die Absichten und die großartige Schenkung Nobels. Die Hofkapelle spielte hierauf ein Andantino von Bariazioni von Norman, und dann war der feierliche Augenblick gekommen, wo die Namen der Preisgekrönten verlesen wurden. Der Präsident der Akademie der Wissenschaften, Professor Hasselberg, teilte mit, daß Professor Lippmann von der Universität der Sorbonne in Paris den Nobel-Preis der Physik erhalten habe, und erwähnte dessen epochemachenden Entdeckungen. Lippmann empfing, wie nach ihm die übrigen Preisgekrönten, unter dem lebhaften Beifall der Versammlung aus der Hand des Königs den Preis, das Diplom und die Medaille, wobei der König seine herzlichsten Glück-

wünsche aussprach. Alsdann teilte Professor Hasselberg mit, daß der Nobel-Preis für Chemie dem Professor Rutherford aus Manchester anerkannt worden sei, und hob dessen wissenschaftliche Verdienste hervor. Der Nobel-Preis für Medizin ist in diesem Jahre geteilt worden und den Professoren Metschnikoff (Rußland) und Ehrlich aus Frankfurt a. M. zugefallen; über die Bedeutung dieser Gelehrten für die medizinische Wissenschaft sprach der Rektor des karolinischen Instituts, Graf Wörner. Professor Björn gab schließlich kund, daß der Literatur-Preis dem Professor Eucken aus Jena zugesprochen sei, und beleuchtete dessen Tätigkeit in einer glänzenden Rede. Von den Preisgekrönten waren Lippmann, Rutherford, Ehrlich und Eucken persönlich erschienen; den Preis für Professor Metschnikow [sic] nahm der hiesige russische Gesandte, Baron v. Budberg, in Empfang. Der feierliche Akt schloß mit einer Ouvertüre zur "Jungfrau von Orleans" und mit der Königshymne. An die Feier schloß sich dann ein großes Festmahl im Grand Hotel an, bei dem der Kronprinz den Vorsitz führte. Morgen, Freitag, veranstalten auch der König und die Königin ein Festmahl im Schlosse, an dem das kronprinzliche Paar, der Herzog und die Herzogin von Södermanland teilnehmen und zu dem ferner der Staatsminister, der Minister des Auswärtigen, der Reichsmarschall, die preisgekrönten Professoren und die Spitzen der Nobel-Stiftung eingeladen sind."

Le "Luxemburger Wort" n'est pas revenu sur Lippmann. Par contre, il a publié le 19 décembre 1908 les portraits de Bajer et Arnoldson accompagnés d'une brève notice biographique. Ses lecteurs n'ont pas appris que Lippmann était d'origine luxembourgeoise.

La mort de Lippman et la presse luxembourgeoise

Le "Wort" a montré une "discretion" encore plus grande au moment de la mort de Lippmann en 1921. Il n'en a pas fait mention du tout, alors que le "Luxemburger Zeitung" n'a pas manqué d'informer ses lecteurs dans son édition du soir du 15 juillet 1921 sur la mort de Lippmann, survenue le 13 juillet 1921¹⁴ à bord du paquebot "La France", et de rappeler ses antécédents luxembourgeois:

"Luxemburg, 15. Juli. An Bord des französischen Passagierdampfers "La France", [der] am Mittwoch im Havre einlief, ist der berühmte französische Gelehrte Gabriel Lippmann gestorben. Er gehörte der Mission Fayolle an, die den Dank Frankreichs an Kanada für dessen Teilnahme am Krieg abgestattet hatte. Gabriel Lippmann war am 16. August 1845 in Hollerich [sic] von französischen Eltern geboren, machte seine Studien in Paris, bezog 1868 die Ecole Normale supérieure und promovierte 1875 mit einer Doktorarbeit an der Sorbonne. Drei

¹⁴Hopley (1973) et Brockhaus Enzyklopädie (1990) indiquent le 12 juillet 1921. Lippmann est cependant bien mort le 13 juillet 1921 (Lemoine 1921).

Jahre später wurde er zum maître de conférences de physique ernannt. 1886 wurde er Mitglied, 1912 Präsident der Akademie der Wissenschaften. Vorher hatte er den Nobelpreis erhalten. Der Verstorbene hatte 1888 die Tochter des Schriftstellers Victor Cherbuliez¹⁵ geheiratet, die ihn auch auf seiner letzten Reise begleitete.

Im Laufe seiner Forschungen war G. Lippmann u.a. zur Entdeckung einer Methode der Farbenphotographie durch Interferenz gelangt, die vor Jahren hier von Emil d'Huart in engerem Kreise demonstriert wurde."

Un cynique hasard a voulu que l'édition du soir du "Wort" de ce même 15 juillet 1921 ait consacré une longue diatribe à la question juive. Dans un article intitulé "Zur Judenfrage", le "Wort", quotidien catholique et conservateur, se réfère à un prétendu plan secret forgé par les sionistes en vue de la conquête du monde par le judaïsme ("*Eroberung der Welt durch das Judentum*"); ce sont les fameux "Protocoles des Sages de Sion" qui auraient été rédigés en 1897 lors d'un congrès sioniste à Berne (en fait un faux document mis en circulation vers 1900 par la police secrète russe¹⁶). Le "Wort" ne s'est pas distancé de ces élucubrations, au contraire, il croit pouvoir constater que dans les grands pays les Juifs seraient effectivement aux postes de commande dans quasi toutes les professions intellectuelles, de même que dans le commerce et les banques. En Russie et en Hongrie des Juifs seraient à la tête des partis socialiste et communiste. Les pères spirituels de la social-démocratie auraient été les Juifs Marx et Lassalle. Le gros de ceux qui auraient tiré profit de la guerre et de la révolution, la majeure partie des trafiquants et usuriers seraient des Juifs. Le "Wort" n'hésite pas à qualifier de dégénérés ces Juifs-là ("entartete Juden") qu'il accuse de ne plus pratiquer leur religion et qu'il oppose ainsi aux Juifs "orthodoxes" auxquels il reproche néanmoins de ne pas épauler l'église catholique dans son combat contre leurs congénères "dégénérés", de même que dans sa lutte contre le matérialisme et la franc-maçonnerie. Serait-ce cet antisémitisme, dont l'éclectisme n'enlève rien à sa virulence, qui empêche le "Wort" de parler de Lippmann, l'un de ces intellectuels juifs qu'il semble avoir en horreur ?

Dans le "Escher Tageblatt" du 15 juillet 1921, nous lisons la courte notice suivante: "*Paris, 14. Juli. Herr Lippmann, Mitglied der französischen Mission in Amerika, ist am 13. Juli an Bord des Passagierschiffes "France" gestorben.*"

¹⁵Victor Cherbuliez (1829-1899), né à Genève de réfugiés français, romancier et érudit français, membre de l'Académie française en 1881 (après naturalisation). Il a écrit des romans, des récits de voyage, des pièces de théâtre; en outre, des écrits politiques qu'il a signés du pseudonyme G. Valbert (voir: Le nouveau dictionnaire des auteurs, t. 1. Paris 1994, Laffont: 661). Je remercie mon collègue Frank Wilhelm pour la documentation qu'il m'a fournie au sujet de cet auteur.

¹⁶Voir Madaule (1996).

Le 16 juillet 1921, le même "Escher Tageblatt", revient à cette nouvelle, tout en fournissant des indications supplémentaires. Il insiste notamment que Lippmann est né à Bonnevoie, et non point à Hollerich comme plusieurs journaux l'auraient annoncé par erreur. Et il continue: *"Wie uns ein Freund unseres Blattes schreibt, hatte sein Vater in dem früheren Bonneweger Kloster eine Handschuhfabrik errichtet, welche später unter der Firma Aug. Charles & Cie zu großer Entwicklung gelangte. Die Handschuhfabrik ist heute verschwunden. Als trauriges Andenken besteht nur noch der dunkle "Lowre"¹⁷ mit seinen lichtscheuen Insassen."*

Le 18 juillet 1921, le "Obermosel-Zeitung" annonce la mort de Lippmann en reproduisant tout simplement le texte du "Luxemburger Zeitung". Le même jour la mort de Lippmann est annoncée aux membres de l'Académie des Sciences de Paris réunis pour leur séance ordinaire du lundi 18 juillet. Après une brève allocution nécrologique le président Georges Lemoine lève la séance publique, Lippmann ayant été président de l'Académie. Les obsèques avaient eu lieu le matin de ce même lundi (Lemoine 1921).

On aurait pu s'attendre à ce que la section des sciences de l'Institut grand-ducal rendit hommage, d'une manière ou d'une autre, au plus célèbre de ses membres d'honneur. Il semble qu'il n'en ait rien été. Le tome VIII des "Archives" de la section, qui englobe les années 1917 à 1924, ne contient aucune allusion à Lippmann, il n'est même pas cité parmi les membres décédés, sur la liste desquels figure d'ailleurs son ancien élève Émile d'Huart, mort le 17 février 1918 (Anonyme 1924).

En 1932, Paul J. Muller publie la première édition de son ouvrage chronologique *"Tatsachen aus der Geschichte des Luxemburger Landes"*. L'attribution du prix Nobel à Gabriel Lippmann en 1908 y est évoquée en ces termes: *"1908. - Physiker Gabriel Lippmann, geboren 1845 in Hollerich [sic] von franz. Eltern, erhält den Nobelpreis, für seine Erfindungen auf dem Gebiet der Farbenphotographie. (†1921)"*. Plus tard, Muller corrigera le lieu de naissance de Lippmann et remplacera Hollerich par Bonnevoie (cf. Muller 1968). Comme événement marquant de l'année 1821, Muller (1932) retient l'installation d'un atelier de fabrication de gants dans la capitale par J. Lippmann, "le père de l'industrie du gant au Luxembourg".

Une très brève notice biographique sur Gabriel Lippmann est incluse dans l'ouvrage de Spedener (1937).

¹⁷Épithète ironique pour le bâtiment principal de l'ancienne ganterie qui après plusieurs changements de propriétaire s'était dégradé progressivement; à côté de tranquilles familles ouvrières, il a fini par héberger une racaille peu appréciée dans le quartier - "rauf- und raublustiges Gesindel", comme s'exprime Hentges (1938). Le 18 juillet 1921, le domaine a été acheté par la ville de Luxembourg qui l'a assaini.

Bonnevoie et Lippmann

Au cours des années 1930, plusieurs publications en rapport avec Bonnevoie et son histoire paraissent au gré des festivités des sociétés locales. Elles ne manquent pas de rappeler le souvenir de Gabriel Lippmann et de sa famille, qui, en tant que fondatrice de la ganterie de Bonnevoie, a joué un rôle non négligeable dans la vie économique de la localité. Dans la brochure éditée en 1935 à l'occasion du cinquantième de la société de gymnastique de Bonnevoie, Pierre Hentges (1935)¹⁸ mentionne brièvement Gabriel Lippmann, de même que son oncle Léon Lippmann. Nous apprenons en plus que l'ancienne "Jugendgasse" (rue des Juifs) s'appelle à l'époque déjà "Lippmannstraße" (rue Gabriel-Lippmann). Hentges (1935) note qu'une certaine tradition orale affirme que Gabriel Lippmann serait né dans la maison n° 17 de la rue Auguste-Charles; il ne nie pas cette possibilité, mais est plutôt d'avis que Lippmann a vu le jour dans le bâtiment de la direction de la ganterie.

Dans la brochure du cinquantième de la chorale "Concordia" parue en 1938, le même Pierre Hentges nous apprend dans une version augmentée de sa précédente histoire de Bonnevoie que la demeure du directeur de la ganterie – donc la maison natale de G. Lippmann – correspond aux numéros 12-14 de la place du Parc (ancienne rue du Couvent). (Dans l'édition du 14 août 1839 du "Journal de la Ville et du Grand-Duché de Luxembourg" nous lisons que la maison Lippmann "à Bonnevoie" est l'une des rares maisons de la ville de Luxembourg et de ses alentours éclairée au gaz, jouissant ainsi "de l'avantage d'un luminaire parfait, égal à la clarté du jour". Un évident signe extérieur de richesse...)

Dans le chapitre "Rue Lippmann (früher Bergstrasse, im Volksmund "Judegäss")", Hentges (1938) retrace l'histoire de la ganterie Lippmann fondée, selon lui, en 1821 par Jonas Lippmann (†1841) qui peu après associa à son entreprise son fils Isaïe (*1804), le père de Gabriel Lippmann. Située d'abord dans la ville de Luxembourg, la ganterie aurait été transférée en 1836 dans les bâtiments de l'ancien couvent de Bonnevoie¹⁹. Vers 1848/49, Isaïe Lippmann a vendu sa

¹⁸Pierre Hentges, né en 1890 à Bonnevoie, marchand de vin, cofondateur des deux sociétés de gymnastique de Bonnevoie, président de l'Entente des Sociétés de Bonnevoie de 1952 à 1969 (Reuter 1972).

¹⁹Sur ce sujet des indications divergentes se trouvent chez Calmes (1971): D'après lui, Jonas Lippmann, venu à Luxembourg d'Ennery près de Metz, entreprit en 1819 la fabrication des gants comme industrie à domicile. La fabrique Lippmann était établie jusqu'en 1837 dans la ville de Luxembourg où elle avait loué une partie de l'ancien couvent des Urbanistes au faubourg de Pfaffenthal. Au cours de l'année 1837 elle transféra son établissement à Bonnevoie, situé alors hors des murs de la ville de Luxembourg en territoire administré par la Belgique. Ces vues sont partagées par Kieffer (1994).

fabrique et a quitté le Luxembourg pour s'installer avec sa famille à Paris.

Hentges (1938) complète son bref historique de la ganterie de Bonnevoie par deux notices biographiques, l'une sur Léon et l'autre sur Gabriel Lippmann, accompagnées d'un portrait photographique de chacun de ces deux personnages. Hentges (1938) rappelle que pendant la guerre 1914-1918 Gabriel Lippmann a rendu de précieux services à sa "patrie d'adoption", la France, par des recherches aux retombées militaires, notamment dans les domaines de l'optique et de l'acoustique. Cette remarque est tout à fait dans l'esprit de cette fin des années trente, où le Luxembourg commence à craindre le pire de la part de l'Allemagne nazie et espère trouver soutien et protection du côté de son voisin, la France. Grégorius (1984) insiste également sur le rôle joué par Lippmann au cours de la Première Guerre Mondiale: *"En tant que Français Gabriel Lippmann n'a pas oublié son pays natal. Ainsi pendant la guerre de 1914/18, nous trouvons, selon une communication de Gaston Holzmacher, Gabriel Lippmann, professeur à la Sorbonne, avec Édouard Herriot, député et maire de Lyon, Frantz Funck-Brentano, bibliothécaire à l'Arsenal, et d'autres Français et Luxembourgeois au Comité de patronage du Comité franco-luxembourgeois, composé de Luxembourgeois réfugiés ou combattant en France et de Français amis du Luxembourg. Un des buts du comité a été de préparer pour l'après-guerre le rapprochement intellectuel, économique et politique des deux pays. Son siège a été au 49 boulevard Saint-Michel à Paris."*

Des données à peu près identiques à celles de Hentges (1938) - sauf qu'il y a une autre photographie de G. Lippmann - se trouvent dans le livre que l'instituteur de l'enseignement primaire supérieur Jean-Pierre Pier²⁰ a publié en 1939 et qu'il a entendu placer dans le contexte des festivités du centenaire de l'indépendance du Grand-Duché, à un moment où la guerre menaçait déjà le Luxembourg. C'est également sur cet arrière-fond qu'il faut voir les articles insérés dans le "Livre du Centenaire". Écrit en 1939 à l'occasion du centenaire de l'indépendance du Luxembourg, sa publication a été court-circuitée par l'invasion du Grand-Duché, pays neutre et sans défense, par les troupes nazies. Le livre n'est paru qu'en janvier 1948, à un moment où le pays commençait de se relever péniblement des ruines de la guerre. Dans l'article d'Alphonse Sprunck (1948) sur l'activité scientifique des Luxembourgeois au cours des siècles, Gabriel Lippmann

Notons que L'Evêque de la Basse-Moûturie (1844) rapporte qu'à l'époque la fabrique de gants de Lippmann aurait occupé mille à deux mille (?) ouvriers (ouvrières).

²⁰Jean-Pierre Pier (*1870 Mamer, †1970 Remich), 1889 instituteur à Strassen, puis, à partir de 1896, pendant 40 ans à Bonnevoie (école primaire, école primaire supérieure) (Molitor 1931, Reuter 1972).

a été cité "parmi les Luxembourgeois [sic] assez nombreux qui ont enseigné à des écoles supérieures de l'étranger". Ses mérites scientifiques y sont très brièvement rappelés.

Les avatars d'une rue

Pendant l'occupation allemande de 1940 à 1944 la rue Gabriel-Lippmann de Bonnevoie portait le nom de "Eifeler Straße" (rue de l'Eifel). On imagine bien que les nazis n'en voulaient pas d'une rue portant le nom d'un savant juif et s'empressaient de lui donner un nom bien allemand, mais pourquoi "Eifeler Straße" ?

Ce fut en 1925, au cours de la séance du 16 mai du conseil municipal de la ville de Luxembourg, qu'il avait été décidé de dédier à Gabriel Lippmann la rue menant vers l'ancienne ganterie Lippmann²¹. Hentges (1935, 1938) nous a appris que dans le temps cette rue s'appelait officiellement "rue de la Montagne" (Bergstraße) alors que vulgairement elle était appelée "Juddegaass" (rue des Juifs).

Le deuxième volume du dictionnaire de la langue luxembourgeoise paru par fascicules entre 1955 et 1962 fournit pour cette dernière désignation l'explication suivante: "*an die jüdische Familie Lippmann erinnernd, der Jonas Lippmann, Gründer der luxemburgischen Handschuhindustrie, und besonders der in Bonneweg geborene Jonas Ferdinand Gabriel Lippmann, Nobelpreisträger für Physik 1908, angehört*" (Wörterbuchkommission 1955/62). Le dictionnaire a par ailleurs répertorié une seconde "Juddegaass" sur le territoire de la ville de Luxembourg; elle a correspondu à la rue de l'Arsenal et la partie attenante de la Grand-Rue (Luxembourg-Ville).

L'oncle Léon Lippmann

Au sujet de Léon Lippmann (1808-1883), en son vivant banquier à Amsterdam, qui a été mentionné plusieurs fois dans les pages précédentes, on consultera Arendt (1904-1910), Calmes (1953) et Lehrmann (1953). Les discours prononcés en 1883 sur la tombe de Léon Lippmann ont été publiés par la suite (Blumenstein et al. 1883), de même que celui prononcé sur la tombe de sa femme, décédée en 1897 (Blumenstein 1897).

Léon Lippmann avait légué à la ville de Luxembourg une somme de 7.000 florins, à charge de prélever sur les intérêts 500 francs par an au profit d'un adolescent, étudiant à l'Athénée de Luxembourg, pour ses études. L'établissement de la fondation Lippmann a été autorisé en 1884 (Bruck 1907). Léon Lippmann avait en outre légué à la ville de Luxembourg une importante collection de tableaux. Dans l'article

²¹Je remercie M. Fernand Emmel, archiviste de la ville de Luxembourg, de m'avoir si aimablement fourni les renseignements concernant cette séance.

de Christophory (1994), une coquille a fait de Gabriel Lippmann le mécène de la ville de Luxembourg; cette erreur n'est pas reprise par l'article de Lunghi (1994) inséré dans le même ouvrage collectif.

Lorsqu'en 1890 le conseil municipal de la ville de Luxembourg décida de créer un "Livre d'Or" pour y inscrire les noms des personnes ayant particulièrement mérité de la ville ou du Grand-Duché, le nom de Léon Lippmann figura sur la liste des quarante premières personnalités proposées (Echternacher Anzeiger 1891).

Le centenaire de la naissance de Lippmann

Robert Stumper (1895-1977), ingénieur-chimiste, myrmécologue et historien des sciences, se réfère dans son ouvrage *"Luxemburger Wissenschaftler im Ausland"* (Stumper 1962) à un article de son crû publié en 1945, à l'occasion du centenaire de la naissance de Lippmann, dans une publication dont il dit, sans aucune autre précision, qu'elle s'appelle "Hémecht". De toute évidence, il ne peut pas s'agir en l'occurrence du bien connu périodique historique du même nom, celui-ci n'ayant repris qu'en 1948 sa parution interrompue par la guerre. Après de longues recherches, j'ai finalement pu dénicher cet article. Il a été inséré dans l'édition du 29 septembre 1945 de l'éphémère hebdomadaire "D'Hémecht" édité de 1944 à 1946 par l'"Uni'on fun de Lëtzeburjer Freihetsorganisati'onen" (Union des organisations luxembourgeoises pour la liberté).

Dans la séance du 31 janvier 1946 de la section des sciences de l'Institut grand-ducal, le professeur de mathématiques et de physique Albert Gloden a présenté une communication sur *"La vie et l'oeuvre scientifique de Gabriel Lippmann"* (Anonyme 1946). Le texte de cette communication a été publié dans les "Archives" de la section des sciences (Gloden 1946). Nous y apprenons que *"pour commémorer le centième anniversaire de la naissance de ce cerveau puissant, le Comité de la Section des sciences de l'Institut Grand-Ducal a demandé au Collège échevinal de la ville de Luxembourg de bien vouloir faire apposer une plaque sur la maison natale de ce savant éminent qui, en élevant si haut le flambeau de la Science, a fait honneur non seulement à la France mais à l'humanité"*. L'inscription proposée était la suivante: *"Dans cette maison naquit / Gabriel Lippmann / Physicien français / Inventeur de la photographie des couleurs / 1845 - 1921 / La Section des Sciences de l'Institut Grand-Ducal"*. Une photo de cette plaque a été publiée dans la brochure commémorative de 1984 dont nous allons parler plus loin (Centre culturel et d'éducation populaire 1984).

Évocations diverses de Lippmann

Au congrès de Luxembourg de l'Association Française pour l'Avancement des Sciences (23-27 juillet 1953), Albert Gloden a parlé de quatre savants français nés au Grand-Duché, le physicien Lippmann, le botaniste Julien Vesque (1848-1895), le mathématicien Herrmann Laurent (1841-1908) et le microbiologiste Edmond Kayser (1857-1940) (Gloden 1953). Le texte de cette communication a été publié par le périodique "Hémecht" en 1954 (Gloden 1954); en ce qui concerne Lippmann, il ne diffère guère de Gloden (1946).

Le centenaire de la section des sciences de l'Institut grand-ducal, solennellement commémoré le 9 décembre 1950, a fourni au secrétaire Alphonse Willems (1896-1976) l'occasion de rappeler les noms des membres honoraires, dont celui de Gabriel Lippmann (Willems 1953).

En 1953, Charles et Graziella Lehrmann retracent l'histoire de la communauté juive du Luxembourg. Gabriel Lippmann et son oncle Léon sont mentionnés dans le chapitre "Les juifs au service du pays".

Dans le contexte des noms de rue de la ville de Luxembourg, Gabriel Lippmann est cité dans le livre "*Luxemburg, deine Heimatstadt*" destiné aux élèves des écoles primaires de la capitale (Feitler 1954). Dans ce même contexte le nom de Lippmann sera cité, entre autres, par Schlottert (1972), Moes (1973), Anonyme (1973), Hentges (1984) et Fayot (1984b).

En 1962, Robert Stumper publie dans l'hebdomadaire "d'Letzeburger Land" une contribution sur Gabriel Lippmann, ceci dans le cadre d'une série d'articles sur les scientifiques luxembourgeois à l'étranger (Stumper 1962a). Au cours de la même année, cette série d'articles paraît sous forme de l'ouvrage broché (Stumper 1962b) auquel il a été fait référence plus haut et que l'auteur a présenté lors de la séance du 14 janvier 1963 de la Société des Naturalistes luxembourgeois (Beck & Mannon 1966). Au cours de la même séance, le professeur Eugène Beck a fait une conférence sur Julien Vesque et ses filles. Vesque a été maître de conférences de botanique à la Faculté des Sciences de Paris; "*son petit appartement de la rue du Sommerard avait été le lieu de rencontre d'un petit cercle de savants: son compatriote et ami Capus*²², *P.P. Dehérain*²³ *qui devint professeur de Physiologie au Muséum, C.E. Bertrand*²⁴, *futur professeur à la Faculté des Sciences de Lille, et deux*

²²Guillaume Capus (1857-1931), né à Esch-sur-Alzette (Luxembourg), botaniste, explorateur, maître de conférences de botanique à la Faculté des Sciences de Paris (1884), à partir de 1897 poste dans l'administration de l'Indochine, plus tard directeur de l'Agriculture et du Commerce de l'Indochine, retour en France en 1907, chargé de cours à l'École supérieure de Commerce et à l'École d'Agriculture coloniale (Stumper 1962, Massard 1989).

²³Pierre Paul Dehérain (1830-1902), auteur d'ouvrages d'agronomie et de chimie agricole, membre de l'Institut (Quillet 1958: 1439).

²⁴Charles-Eugène (alias Charles-Egmont) Bertrand (1851-1917), naturaliste,

futurs prix Nobel, le chimiste Henri Moissan²⁵ et le physicien Gabriel Lippmann né à Bonnevoie en 1845" (Beck & Mannon 1966).

Le souvenir de Lippmann a encore été rappelé à la tribune de la Société des Naturalistes luxembourgeois le 21 novembre 1966 lors de la conférence du professeur de chimie Armand Bartz sur la photochimie et l'histoire de la photographie. Après avoir fait le tour de la question, le conférencier mentionne le procédé Lippmann, dans le souci d'être complet, tout en regrettant que l'exploitation de ce procédé "*se heurte à des difficultés techniques peut-être insurmontables*" (Bartz 1973).

En août 1970, le professeur Joseph Hess évoque le souvenir de Gabriel Lippmann au cours d'une causerie radiophonique sur les ganteries au Luxembourg. Il ne semble pas avoir réalisé que Lippmann a quitté le Luxembourg tout jeune. En plus, par suite d'une faute typographique, la version imprimée de la causerie indique comme date de naissance le 19 août 1845 au lieu du 16 août (Hess 1983). En 1972, le F.C. Aris de Bonnevoie fête son cinquantenaire; la ganterie Lippmann et Gabriel Lippmann sont brièvement évoqués dans la brochure commémorative (Reuter 1972). En 1973, c'est le 75^e anniversaire de la fanfare municipale de Luxembourg-Bonnevoie, l'occasion de sortir une brochure, une de plus. La rue Lippmann y est mentionnée (Moes 1973, Anonyme 1973). D'autres brochures locales ne manquent pas de citer Lippmann; elles ne contiennent cependant aucun renseignement inédit: Livre d'Or du Centenaire de la Société de Gymnastique de Bonnevoie (Folmer 1984); brochure du 75^e anniversaire des "Lions Bleus", scouts FNEL de Bonnevoie (Friedrich 1989, Grégorius 1989); brochure du 10^e anniversaire de l'Association artisanale et commerciale Bonnevoie-Howald (Nicklaus 1993).

L'article de Friedrich (1984a) dans la brochure éditée à l'occasion du 75^e anniversaire de l'Union Sportive de Luxembourg est assez important par son étendue. En outre, il contient une information moins connue: Lippmann avait été en relation avec Louis Lumière, l'inventeur du cinématographe, et ce dernier avait même fait le 16 novembre 1895 la démonstration de son invention dans le cours de Lippmann, avant de la présenter le 28 décembre 1895 au grand public (Friedrich 1984a, 1987).

En 1983, le souvenir de la famille Lippmann et de son rejeton

docteur ès sciences en 1874, préparateur au laboratoire de la faculté des sciences de Paris jusqu'au 1^{er} mars 1878, nommé à Lille, d'abord comme chargé de cours, puis, en 1881, comme professeur de botanique à la faculté des sciences, travaux de recherches sur les charbons et la géologie des roches d'origine organique dans le contexte de la paléontologie botanique (Lautour 1954).

²⁵Henri Moissan (1852-1907), pharmacien et chimiste français, professeur à l'École de Pharmacie de Paris (1886), puis à la Sorbonne (1900); développa l'emploi des températures élevées grâce au four électrique; prix Nobel de chimie en 1906 (Galiana & Rival 1996).

le plus célèbre est évoqué, en passant, dans un article sur le vieux cimetière juif de Clausen (Kaiser 1983). Son auteur s'est documenté chez Friedrich (1979).

Dans son ouvrage sur l'évolution de la vie culturelle du Luxembourg au 19^e siècle, Pierre Grégoire (1981) cite Gabriel Lippmann pour la qualité littéraire de ses écrits dont certains extraits pourraient bien figurer, à son avis, dans une anthologie de la prose luxembourgeoise.

Inauguration d'une nouvelle plaque commémorative

En 1984 prend corps le projet d'apposer une nouvelle plaque commémorative à la maison natale de Gabriel Lippmann – devenue la propriété de l'éditeur Guy Binsfeld –, en remplacement de celle de 1946 disparue entre-temps. L'initiateur du projet est le Centre culturel et d'éducation populaire (Volksbildungsverein) de Bonnevoie qui organise cette commémoration en collaboration avec la section des sciences de l'Institut grand-ducal. Les "Nouvelles de Bonnevoie" annoncent l'événement dans un article écrit par Grégorius (1984a). La presse nationale emboîte le pas, de manière directe avec une contribution ad hoc (Grégorius 1984b, Luxemburger Wort 1984a), de manière indirecte avec un compte rendu du contenu des "Nouvelles de Bonnevoie" (Tageblatt 1984, Lëtzebuurger Journal 1984).

L'inauguration de la plaque, qui a lieu dans l'après-midi du vendredi 13 avril 1984, est bien couverte par la presse indigène (Luxemburger Wort 1984, Tageblatt 1984, Républicain Lorrain 1984). Ben Fayot, secrétaire du Centre culturel et d'éducation populaire, a salué les nombreux invités d'honneur, dont l'échevin Jean Goedert, les conseillers municipaux Hary Ackermann, Robert Goebbels et Robert Angel, l'ancien président de la chambre des députés René van den Bulcke, le grand rabbin Emmanuel Bultz, le curé Jos Felten.

L'allocution du président du Centre culturel, René Grégorius, a eu comme objet la biographie de Gabriel Lippmann et l'histoire de sa famille, alors que Jacques Bintz, président de la section des sciences de l'Institut grand-ducal a analysé dans son discours l'oeuvre scientifique de Lippmann. La cérémonie s'est terminée par le traditionnel vin d'honneur.

La plaque fixée à la façade de la maison Guy Binsfeld porte l'inscription suivante: "*Maison natale / de / Gabriel Lippmann / Prix Nobel de physique / 1908*". Elle est reproduite sur la couverture de la brochure éditée en commémoration de cette journée (Centre culturel et d'éducation populaire 1984). Richement illustrée, cette brochure de 27 pages non numérotées comporte un avant-propos de Ben Fayot (Fayot 1984), le texte de l'annonce adressée à la presse (Anonyme 1984, identique à Grégorius 1984b), une notice biographique sur Gabriel Lippmann (Grégorius 1984c), l'analyse de l'oeuvre scientifique de Lipp-

mann (Bintz 1984) et des notes généalogiques sur la famille Lippmann (Erpelding 1984).

En 1989, l'année des festivités du 150^e anniversaire de l'indépendance du Grand-Duché, Martin Gerges, le responsable des Publications Mosellanes, publie un gros volume qui, sous le titre "*Mémorial 1989*", entend brosser le tableau complet de la société luxembourgeoise de 1839 à 1989. Gabriel Lippmann y est cité dans les contributions de Bové (1989), Moyse (1989) et Massard (1989). Dans ce dernier article nous apprenons que le professeur de physique luxembourgeois Jean Koppes (1879-1957), qui a fait ses études universitaires à Paris, y a fréquenté les cours de Gabriel Lippmann, une information tirée de l'article de Stumper (1954). Koppes a d'ailleurs suivi aussi les cours du professeur Édouard Branly, qui – nous l'avons vu – avait été nommé membre d'honneur de la section des sciences de l'Institut grand-ducal en même temps que Lippmann.

Le 150^e anniversaire de la naissance de Gabriel Lippmann

Le 16 août 1995, le jour même du 150^e anniversaire de la naissance de Gabriel Lippmann, le "*Lëtzebuurger Journal*" a consacré une page entière à la mémoire de ce "pionnier de la photographie des couleurs" (Sauber 1995).

La section des sciences de l'Institut grand-ducal a commémoré cet anniversaire par une exposition, dont le vernissage a eu lieu le vendredi 20 octobre 1995, et une séance académique, qui s'est déroulée le lendemain.

L'exposition a été accessible au public du 23 au 28 octobre 1995. À caractère historique et didactique, elle a illustré "*la signification et la portée des travaux de Gabriel Lippmann à l'aide d'objets originaux et de réalisations modernes*". Elle a bénéficié des concours suivants: École polytechnique fédérale de Lausanne, musée de l'Élysée de Lausanne, Palais de la découverte de Paris, École normale supérieure de Paris, Société française de physique, Société française de photographie, Bibliothèque nationale de Luxembourg.

Le programme de la séance académique a comporté cinq exposés, à savoir: "*L'œuvre scientifique de Gabriel Lippmann*" par Jacques Bintz, président de la section des sciences de l'Institut grand-ducal; "*Gabriel Lippmann, physicien et inventeur à la charnière de deux époques*" par Jean-Pierre Hansen, directeur du département de physique de l'École normale supérieure de Lyon; "*Interférences et résonance optique: de l'oiseau bleu à la photographie en couleurs de Gabriel Lippmann*" par Jean-Marc Fournier, The Rowland Institute for Science, Cambridge, MA; "*Refroidissement d'atomes par laser*" par Robin Kaiser, Institut d'optique théorique et appliquée, Université de Paris-Orsay; et enfin, "*L'intérêt des idées de Gabriel Lippmann pour les*

mathématiques” par Jean-Paul Pier, Centre universitaire de Luxembourg. Précisons que tous ces orateurs, sauf J.-M. Fournier, sont des Luxembourgeois.

La commémoration a été annoncée dans la presse luxembourgeoise (ex. Luxemburger Wort 1995). Le “Luxemburger Wort” du 23 octobre 1995 a présenté l’exposition à ses lecteurs, de même que le “Lëtzebuurger Journal” du 25 octobre. Un compte rendu plus exhaustif de l’ensemble de la commémoration a été publié dans le “Wort” par Jean-Paul Pier (1995) qui a même proposé dans son article de rebaptiser le Centre Universitaire et de l’appeler à l’avenir “Centre Universitaire Gabriel Lippmann de Luxembourg”, une voie dans laquelle il n’a guère été suivi. Mais lorsqu’il se demande si le souvenir de Lippmann restera gravé d’une manière aussi inaltérable dans la mémoire des Luxembourgeois que l’image qu’il a fixée sur ses plaques photographiques, on peut le réconforter sans hésitation: Gabriel Lippmann, l’enfant de Bonnevoie auquel a été octroyé le prix Nobel, n’est et ne sera pas oublié dans sa patrie d’origine. L’ensemble de la littérature que nous venons de citer est là pour en témoigner.

Références

Anonyme (1908): Institut grand-ducal de Luxembourg, Section des Sciences naturelles, physiques et mathématiques: bureau de la société, membres effectifs, membres honoraires, membres agrégés. - Archs Inst. g.-d. Luxemb., Sect. Sci. nat., phys., math., N.S. 2-3 (1907-1908): I-IV.

Anonyme (1924): Institut grand-ducal de Luxembourg, Section des Sciences naturelles, physiques et mathématiques: bureau de la section, membres effectifs, membres honoraires, membres agrégés, décès. - Archs Inst. g.-d. Luxemb., Sect. Sci. nat., phys., math., N.S. 8 (1917-1924): 3-7.

Anonyme (1946): Séance du jeudi, 31 janvier 1946. - Archs Inst. g.-d. Luxemb., Sect. Sci. nat., phys., math., N.S. 16 (1938-1946): XV.

Anonyme (1973): Geschichtliches über Bonnewegs Straßen. - in: Fanfare Municipale de Luxembourg-Bonnevoie, 75^e Anniversaire, 1898-1973. Luxembourg, non paginé [7 pp.]

Anonyme (1984): Gedenkfeier für Gabriel Lippmann in Bonneweg (Vorankündigung in der Presse). - in: Inauguration d’une plaque à la mémoire de Gabriel Lippmann par le Centre culturel et d’éducation populaire de Bonnevoie et la Section des sciences de l’Institut grand-ducal. Bonnevoie, le 13 avril 1984: 5-7 [texte de Grégorius 1984a].

Arendt, Karl (1904-1910): *Porträt-Galerie hervorragender Persönlichkeiten aus der Geschichte des Luxemburger Landes*. Bd. 1-6. - Neuauflage. Luxemburg, Ed. Kutter, 1972, 514 + 6 p.

[Bartz, Armand] (1973): *La photochimie et l'histoire de la photographie*. - *Bull. Soc. Nat. luxemb.*, 71-75 (1966-1970): 26-27.

[Beck, Eugène & T. Mannon] (1966): *Travaux de la Société des Naturalistes luxembourgeois en 1963: Séance du 14 janvier 1963*. - *Bull. Soc. Nat. luxemb.*, 68 (1963): 179-183.

Berget, Alphonse (1907): *Gabriel Lippmann*. - *Revue luxembourgeoise, littérature, art, science*, 2 (2): 99-101.

Bintz, Jacques (1984): *L'oeuvre scientifique de Gabriel Lippmann*. - in: *Inauguration d'une plaque à la mémoire de Gabriel Lippmann par le Centre culturel et d'éducation populaire de Bonnevoie et la Section des sciences de l'Institut grand-ducal*. Bonnevoie, le 13 avril 1984: 21-23.

Blum, Martin (1902-1932): *Bibliographie luxembourgeoise ou catalogue raisonné de tous les ouvrages ou travaux littéraires publiés par des Luxembourgeois ou dans le Grand-Duché actuel de Luxembourg*. Première partie: *Les auteurs connus*. Nouvelle édition, complétée, avec introduction et index analytique, par Carlo Hury. First published 1902-1932. Reprinted 1981. - München, Kraus International Publications, vol. 1: A-L, XXXIII-756 p., vol. 2: M-Z, 700 p.

Blumenstein, Isaac (1897): *Rede gehalten am Grabe der verewigten Frau Leo Lippmann, den 10. Januar 1897*. - Luxemburg, Th. (Emile) Schroell, 8 p. [cité par Blum, vol. 1].

Blumenstein, Isaac, Rikoff & A. Gaismann (1883): *Reden gehalten am Grabe des verewigten Herrn Grossherzoglichen Luxemburgischen Generalconsuls Leo Lippmann, Ritter hoher Orden, gestorben in Amsterdam, in einem Alter von 75 Jahren, am 11. November, beerdigt in Luxemburg, am 15. November 1883*. - Luxemburg, Th. Schroell, 13 p. [cité par Blum, vol. 1].

Bové, Alfred (1989): *Luxemburger im Ausland*. - in: M. Gerges (éd.): *Mémorial 1989: la Société luxembourgeoise de 1839 à 1989*. Luxembourg, Les Publications Mosellanes: 182-202.

Brockhaus Enzyklopädie (1990): *Dreizehnter Band* (19. Aufl.). - Mannheim, F.A. Brockhaus, 704 p.

Brockhaus Enzyklopädie (1994): *Band 25* (19. Aufl.): *Personenregister*. - Mannheim, F.A. Brockhaus, 1051 p.

Bruck, Auguste (1907): *Fondations de bourses d'études instituées en faveur des Luxembourgeois*. 2e édition. - Luxemburg, J. Beffort, 1082 p. [Léon Lippmann: 388-390].

Calmes, Albert (1953): Le premier consul du Grand-Duché. - Die Warte, 15. Apr. 1953.

Calmes, Albert (1971): Naissance et débuts du Grand-Duché, 1814-1830. Le Grand-Duché de Luxembourg dans le Royaume des Pays-Bas. - Luxembourg, 570 p. (= Histoire contemporaine du Grand-Duché de Luxembourg, vol. 1).

Centre culturel et d'éducation populaire (1984): Inauguration d'une plaque à la mémoire de Gabriel Lippmann par le Centre culturel et d'éducation populaire de Bonnevoie et la Section des sciences de l'Institut grand-ducal. Bonnevoie, le 13 avril 1984. - s.l., 27 p.

Christophory, Jules (1994): La ville de Luxembourg, un carrefour de cultures. - in: G. Trausch: La Ville de Luxembourg. Anvers, Fonds Mercator: 335-349.

Crystal, David (1994): The Cambridge Biographical Encyclopaedia. - Cambridge, Cambridge University Press, 1304 p.

DBE (1995): Deutsche Biographische Enzyklopädie (DBE). Bd. 1. - München, K.G. Saur, 642 p.

Echternacher Anzeiger (1891): No 1 (1. Jan.): 2.

Encyclopaedia Universalis (1996): Thesaurus: Kowar - Réac. - Paris, Encyclopaedia Universalis: 2013-3060.

Erpelding, Emile (1984): Notes généalogiques sur la famille Lippmann. - in: Inauguration d'une plaque à la mémoire de Gabriel Lippmann par le Centre culturel et d'éducation populaire de Bonnevoie et la Section des sciences de l'Institut grand-ducal. Bonnevoie, le 13 avril 1984: 24-25.

Evêque de la Basse-Moûturie, L' (1844): Itinéraire du Luxembourg germanique, ou Voyage historique et pittoresque dans le Grand-Duché. - Luxembourg, Libr. V. Hoffman, 1844, XXIX-500 p. [réédit. 1980, Luxembourg, J.-P. Kripler-Muller].

Faber, Gustave & M. Grechen (1907): La photographie des couleurs. - Revue luxembourgeoise, littérature, art, science, 2 (2): 93-98.

Fayot, Ben (1984a): Avant-propos. - in: Inauguration d'une plaque à la mémoire de Gabriel Lippmann par le Centre culturel et d'éducation populaire de Bonnevoie et la Section des sciences de l'Institut grand-ducal. Bonnevoie, le 13 avril 1984: 3-4.

Fayot, Ben (1984b): Les noms de rue de Bonnevoie, de Hollerich et de la Gare. - in: Union Sportive Luxembourg: 75^e anniversaire, 1908-1983. Luxembourg: 94-98

Feitler, Eduard (1954): Luxemburg, deine Heimatstadt. - Luxemburg, St. Paulus-Druckerei, 207 p.

Folmer, Nic. (1984): Die Entwicklung Bonnewegs. - in: Société de Gymnastique Bonnevoie: Livre d'Or du Centenaire, 1884-1984. Luxembourg, Imprimerie Saint-Paul: 17-30.

Friedrich, Evy (1979): Den ale Juddekiirfech. - Ons Stad 1979, No 2: 10-12.

Friedrich, Evy (1980): Kalennerblieder. Bd. 1. - Lëtzebuerg, J.P. Krippler, 397 p. [Lippmann: 208].

Friedrich, Evy (1984a): Der Bonneweger Nobelpreisträger Gabriel Lippmann und seine Familie. - in: Union Sportive Luxembourg: 75e anniversaire, 1908-1983. Luxembourg: 123-127.

Friedrich, Evy (1984b): Bona Via, Bonus Vicus. Bonneweg und seine Geschichte. - Ons Stad, Nr. 16: 11-13.

Friedrich, Evy (1987): Ein Nobelpreisträger aus Bonneweg. - Lëtzebuurger Revue, 43 (28): 12.

Friedrich, Evy (1989): Bona Via, Bonus Vicus: Bonneweg und seine Geschichte. - in: Les Lions Bleus, 1914-1989: 75 Joër Scoutissem zu Bouneweg: 91-93.

Funck-Brentano, Théophile (1896): Méthode et principes des sciences naturelles. Introduction à l'étude de la médecine. - Paris, L. Bataille & Cie, 140 p.

Galiana, Thomas de & Rival, Michel (1996): Dictionnaire des inventeurs et inventions. - Paris, Larousse, 822 p. (= Larousse in extenso)

Gloden, Albert (1946): La vie et l'oeuvre scientifique de Gabriel Lippmann. - Archs Inst. g.-d. Luxemb., Sect. Sci. nat., phys., math., N.S. 16 (1938-1946): 25-28.

Gloden, Albert (1953): Quatre savants français nés au Grand-Duché de Luxembourg. - in: Actes du Congrès de Luxembourg, 72e session de l'Association Française pour l'Avancement des Sciences. Publs littér. sci. Min. Educ. natn. G.-D. Luxemb., 3, Luxembourg: 547.

Gloden, Albert (1954): Savants français nés au Grand-Duché de Luxembourg. - Communication présentée à la 17e section (Histoire et Philosophie des Sciences) du Congrès de Luxembourg de "l'Association Française pour l'Avancement des Sciences", 1953. - Hémecht 1954: 351-359.

Grégoire, Pierre (1981): Luxemburgs Kulturentfaltung im neunzehnten Jahrhundert. Eine kritische Darstellung des literarischen, künstlerischen und wissenschaftlichen Lebens. - Luxemburg, De Frëndeskrees, 578 p.

Grégorius, René (1984a): Am 13. April 1984: Enthüllung einer Gedenktafel am Geburtshause des Nobelpreisträgers Gabriel Lippmann. - *Nouvelles de Bonnevoie*, No 16 (mars 1984).

[Grégorius, René] (1984b): Gedenkfeier für Gabriel Lippmann in Bonneweg. - *Tageblatt* 1984, Nr. 76 (31. März): 9. [signiert: R.G.]

Grégorius, René (1984c): Gabriel Lippmann. Notice biographique. - in: Inauguration d'une plaque à la mémoire de Gabriel Lippmann par le Centre culturel et d'éducation populaire de Bonnevoie et la Section des sciences de l'Institut grand-ducal. Bonnevoie, le 13 avril 1984: 8-20.

Grégorius, René (1989): Geboren in Bonneweg: Gabriel Lippmann, Nobelpreis für Physik 1908. - in: *Les Lions Bleus, 1914-1989: 75 Joër Scoutissem zu Bouneweg*: 82.

Hentges, Pierre (1935): Bonneweg und die Bonneweger. - in: *Festbroschüre zum 50-jährigen Stiftungsfeste des Turnvereins von Bonneweg und 8ten Regionalfeste der Turner des Zentrums. Luxemburg*: 27-81.

Hentges, Pierre (1938): Dorfstrassengesang: ein Beitrag zur Heimatkunde aus der Vergangenheit Bonnewegs. - in: *Société chorale "La Concorde" Bonnevoie, 50e Anniversaire, 1888-1938. Luxemburg, Imprimerie Bourg-Bourger*: 45-147

Hentges, Pierre (1984): Bonneweg und die Bonneweger. - in: *Société de Gymnastique Bonnevoie: Livre d'Or du Centenaire, 1884-1984. Luxemburg, Imprimerie Saint-Paul*: 31-35. [extr. de Hentges (1935)]

Hess, Joseph (1983): *Bei eis doheem. Bd. 2: Vu Land a Leit.* - Luxemburg, RTL Edition, 269 p.

Hopley, I.B. (1973) Gabriel Jonas Lippmann. - in: C.C. Gillispie (ed.): *Dictionary of Scientific Biography*, vol. 8. New York, Charles Scribner's Sons: 387-388.

Huart, Émile d' (1906): *La photographie des couleurs.* - *Archs Inst. g.-d. Luxemb., Sect. Sci. nat., phys., math., N.S. 1 (I-II, janvier-juin 1906)*: 58-80.

Journal de la Ville et du Grand-Duché de Luxembourg (1839): No 65 (14 août): 3.

[Kaiser, Marcel] (1983): Der alte Judenfriedhof in Clausen. - *Tageblatt* 1983, Nr. 171 (28. Jul.): 3. [signiert: K.M.]

Kieffer, Monique (1994): La ville industrielle. - in: G. Trausch: *La Ville de Luxembourg. Anvers, Fonds Mercator*: 241-257.

Lautour, A.M. (1954): Charles-Eugène Bertrand. - in: *Dictionnaire de biographie française*, t. 6 (Paris): col. 267.

Lebon, Ernest (1911): Gabriel Lippmann. Biographie, bibliographie, analytique des écrits. - Paris, Gauthiers-Villars, 70 p.

Lehrmann, Charles et Graziella (1953): La communauté juive du Luxembourg dans le passé et dans le présent. - Esch-sur-Alzette, Impr. Coopérative Luxembourgeoise, 154 p.

Lemoine, Georges (1921): [Gabriel Lippmann †]. - C.R. Acad. Sci. Paris, 173 (3): 114-115.

Lëtzebuurger Journal (1984): No 72 (13. Apr.): 9 ("Nouvelles de Bonnevoie" erschienen).

Lëtzebuurger Journal (1995): 25. Okt.: 14 (Leben und Werk von Gabriel Lippmann. Eine Ausstellung im Centre Universitaire ehrt den Physiker und Nobelpreisträger.)

Lippmann, Gabriel (1907): La science et l'industrie. - Revue luxembourgeoise, littérature, art, science, 2 (2): 102-109.

Lunghi, Enrico (1994): L'art et la ville. - in: G. Trausch: La Ville de Luxembourg. Anvers, Fonds Mercator: 351-361.

Luxemburger Wort (1906): No 30 (30. Jan.): 2 (Volkshochschule).

Luxemburger Wort (1908): No 346 (11. Dez.): 1 (Die Verteilung der Nobelpreise); No 354 & 355 (19. & 20. Dez.): 1 (Träger des Nobel-Friedenspreises).

Luxemburger Wort (1921): No 163 (15. Jul., Abend-Ausgabe): 1 (Zur Judenfrage).

Luxemburger Wort (1984): No 85 (11. Apr.): 6 (Am kommenden Freitag in Bonneweg: Gedenkfeier für den Nobelpreisträger Gabriel Lippmann); No 88 (14. Apr.): 10 (Gestern Nachmittag in Bonneweg: Gedenkfeier für den Nobelpreisträger Gabriel Lippmann).

Luxemburger Wort (1995): 18. Okt.: 6 (Commemoration du 150^e anniversaire du savant Gabriel Lippmann, 1845-1921); 23. Okt.: 4 (Das Leben und Werk des Wissenschaftlers Gabriel Lippmann. Eine Ausstellung im "Centre Universitaire").

Luxemburger Zeitung (1891): No 36 (5. Febr.): 1-2 (Pariser Brief. Paris, 4. Februar. [Morgens]).

Luxemburger Zeitung (1908): No 346 (11. Dez., Abend-Ausgabe): 3 (Die Verteilung der Nobelpreise); No 347 (12. Dez.): 2-3.

Luxemburger Zeitung (1921): No 196 (15. Jul., Abend-Ausgabe): 2.

Madaule, Jacques (1996): Antisemitisme. - in: Encyclopaedia Universalis. Corpus, vol. 2, Paris: 616- 623.

Massard, Jos. A. (1989): La vie scientifique. - in: M. Gerges (éd.): Mémorial 1989: la Société luxembourgeoise de 1839 à 1989. Luxembourg, Les Publications Mosellanes: 408-440.

Mersch, Jules (1969): Les barons d'Huart. - Biogr. natn. Luxemb., fasc. 17: 165-337. [Émile d'Huart: 317-331]

Moes, Emile (1973): Bonneweg: Jugenderinnerungen. - in: Fanfare Municipale de Luxembourg-Bonnevoie, 75^e Anniversaire, 1898-1973. Luxembourg, non paginé [article de 33 pp.]

Molitor, Michel (1931): Der luxemburgische Lehrer in seiner schriftstellerischen Betätigung von 1815-1930. - Luxemburg, Fr. Bourg-Bourger, 157 p.

Moyse, Laurent (1989): La communauté israélite. - in: M. Gerges (éd.): Mémorial 1989: la Société luxembourgeoise de 1839 à 1989. Luxembourg, Les Publications Mosellanes: 318-320.

Muller, Paul J. (1932): Tatsachen aus der Geschichte des Luxemburger Landes. - Éditions des Cahiers Luxembourgeois, Luxembourg, Paul Schroell, 223 p.

Muller, Paul J. (1968): Tatsachen aus der Geschichte des Luxemburger Landes. - Luxembourg, Vlg. "De Frendeskres" u. Impr. Bourg-Bourger, 574 p.

Nicklaus, Albert (1993): Beitrag zur Geschichte Bonnewegs. - in: Association Artisanale et Commerciale Bonnevoie-Howald: 10^e Anniversaire. Luxembourg, Imprimerie Saint-Paul: 56-61.

Obermosel-Zeitung (1921): No 109 (18. Jul.): 2 (Sterbefall).

Pier, Jean-Paul (1995): Gabriel Lippmann: le message d'un savant d'origine luxembourgeoise. - Luxemburger Wort 1995, No 243 (24. Okt.): 6.

Pier, Johann Peter (1939): Bonneweg in Mittelalter und Neuzeit und seine geschichtlichen Beziehungen zu Hollerich. - Luxembourg, Sankt-Paulus-Druckerei, 244 p.

Quillet (1958): Dictionnaire encyclopédique Quillet. Publié sous la direction de Raoul Mortier. 6 vol. - Paris, Librairie Aristide Quillet, 5929 p.

Républicain Lorrain (Le) (Édition de Luxembourg) (1984): 15 avril: 5 (À Bonnevoie, le prix Nobel Gabriel Lippmann retrouve une plaque sur sa maison natale.).

Reuter, Paul (1972): Bonneweg im Wandel der Zeiten. - in: F.C. Aris, Livre d'Or du Cinquantenaire, 1922-1972. Luxembourg, Imprimerie Saint-Paul: 43-87.

Sauber, Gilbert (1995): Pionier der Farbfotografie: Gabriel Lippmann, Nobelpreisträger für Physik, wurde vor 150 Jahren in Bonneweg geboren. - Lëtzebuurger Journal 1995, No 153 (16. Aug.): 5. [signiert: gs.]

Schlottert, Félix (1972): Einiges über die Geschichte Bonnewegs. - in: Sapeurs-pompiers Bonnevoie, Centenaire 1872-1972: 53-68.

Schmit, Roger (1996): Franz Brentano et le Luxembourg. - Nos cahiers, 17 (1): 63-85.

Spedener, Gregor (1937): Die im Luxemburger Lande lebten und webten. Biographische Notizen. - Grevenmacher, P. Faber, 106 p.

Sprunck, Alphonse (1948): L'activité scientifique. - in: Le Luxembourg: Livre du Centenaire. Luxembourg: 311-334.

Stumper, Robert (1945): À propos d'un centenaire: Gabriel Lippmann, 1845-1921. - D'Hémécht, 2e année, No 1 (29 sept. 1945): 4.

Stumper, Robert (1954): Hommage à M. J. Koppes à l'occasion de son 75^e anniversaire. - Archs Inst. g.-d. Luxemb., Sect. Sci. nat., phys., math., N.S. 21: 7-16.

Stumper, Robert (1962a): Luxemburger Wissenschaftler im Ausland: Physiker Gabriel Lippmann. - d'Letzeburger Land 1962, No 12 (23. März): 6.

Stumper, Robert (1962b): Luxemburger Wissenschaftler im Ausland. - Luxemburg, Vlg. Letzeburger Land, 114 S.

Tageblatt (Escher) (1921): No 163 (15. Jul.): 5 (Kleine Mitteilungen); No 164 (16. Jul.): 5 (Luxemburg, 15. Juli. Sterbefall).

Tageblatt (1984): No [85] (11. Apr.): 8 (Nouvelles de Bonnevoie) [numérotation erronée: 95 au lieu de 85]; No 88 (14. Apr.): 8 (Gedenktafel für Gabriel Lippmann, luxemburgischer Nobelpreisträger und Vater der Farbphotographie).

Willems, Alphonse (1957): Hommage à la mémoire de M. Jean Koppes, président d'honneur. - Archs Inst. g.-d. Luxemb., Sect. Sci. nat., phys., math., N.S. 24: 11-14.

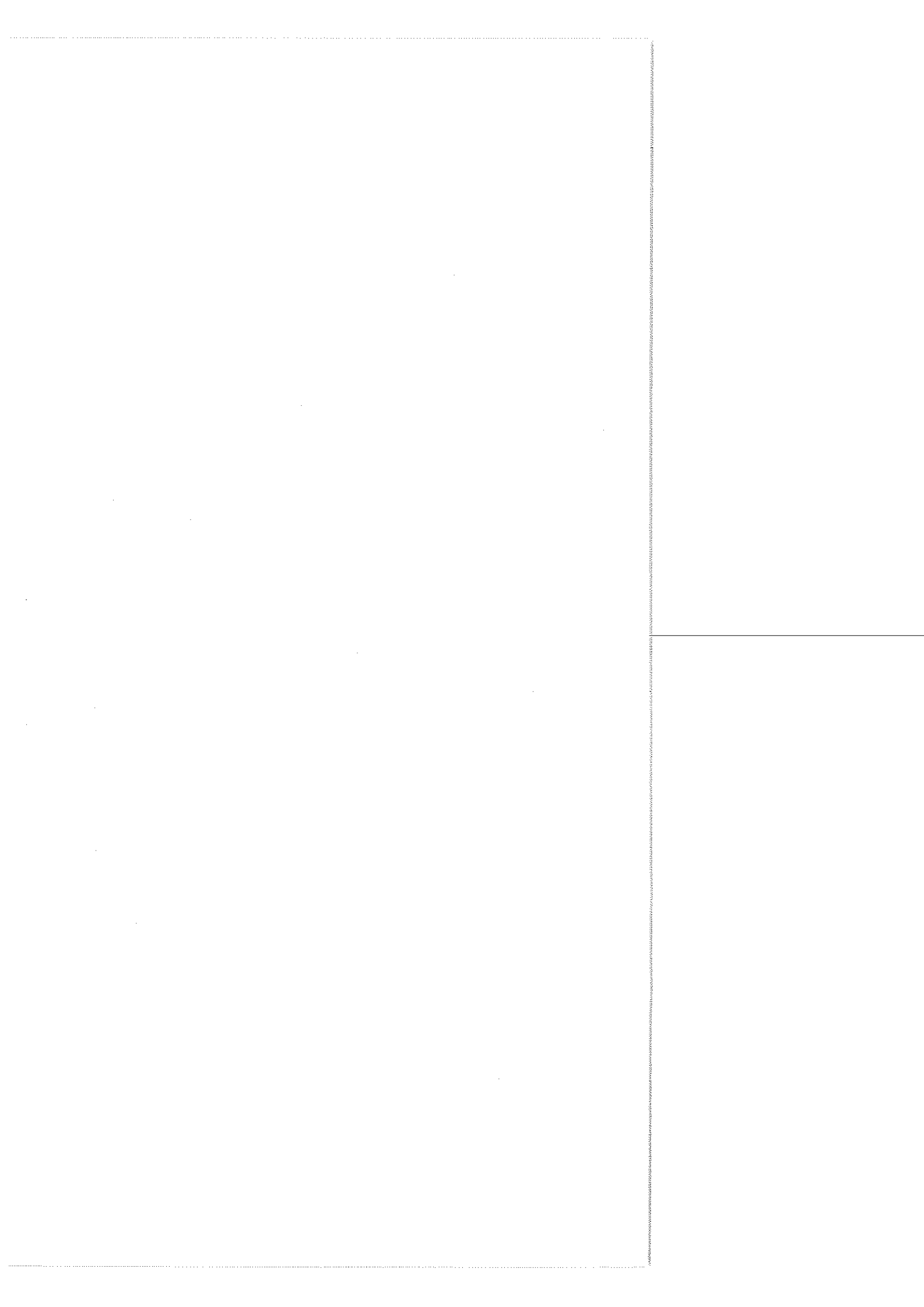
[Willems, Alphonse] (1953): Le centenaire de la Section des Sciences de l'Institut Grand-Ducal. - Archs Inst. g.-d. Luxemb., Sect. Sci. nat., phys., math., N.S. 20 (1951-1953): 5-23.

Wörterbuchkommission (1955/62): Luxemburger Wörterbuch. Bd. II. G-K. - Luxemburg, Linden, 490 p. [réimpression 1987, éditpress, Esch-sur-Alzette].

En complément de dernière minute ajoutons à la bibliographie le titre suivant: Mersch, Jules (1962): Une branche de la famille Funck. - Biogr. natn. Luxemb., fasc. 11: 215-290. Outre les biographies de Théophile Funck-Brentano et de son fils Frantz (voir plus haut p. 96), nous y lisons une remarque acerbe de l'écrivain francophile luxembourgeois Marcel Noppeney (1877-1966) qui, en 1961, s'est plaint de ce que souvent les intellectuels luxembourgeois ayant acquis la célébrité à

l'étranger soient entièrement négligés en leur pays d'origine, ou qu'on les "loge au diable" comme, entre autres, Lippmann. Il s'agit sans doute d'une allusion à la rue Lippmann, qui aux yeux de Noppeney ne présente manifestement pas l'éclat qui conviendrait à un prix Nobel. Noppeney semble avoir oublié que c'est dans les parages de cette rue qu'a vécu le tout jeune Lippmann, et que, de ce point de vue, le choix est parfaitement justifié.

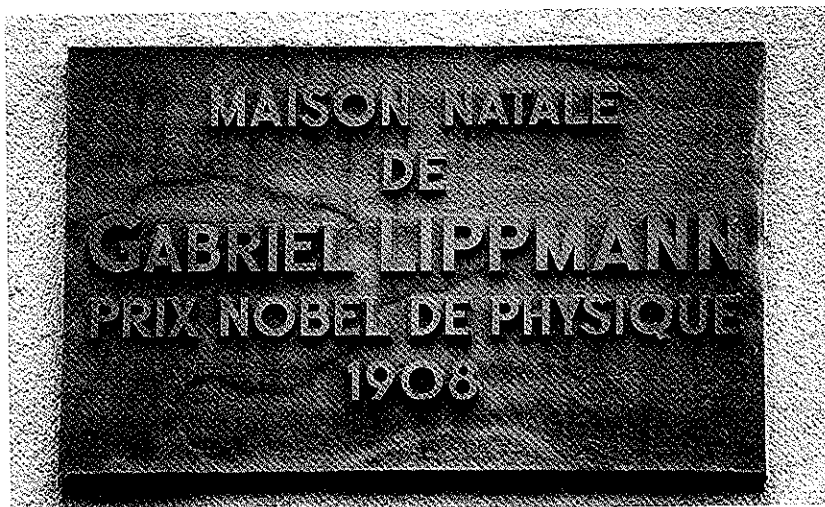
Séminaire d'histoire des sciences et de la médecine
Centre universitaire de Luxembourg
162 A, avenue de la Faïencerie
L-1511 Luxembourg



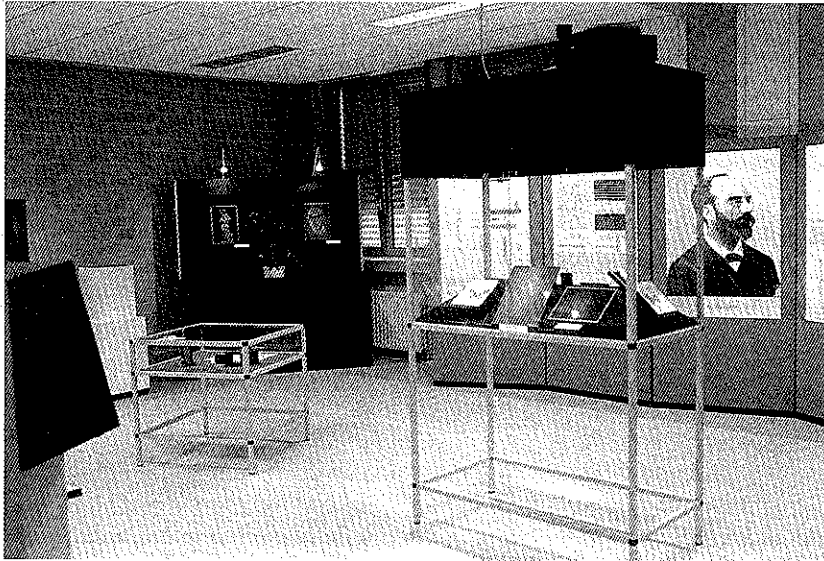
Documentation photographique



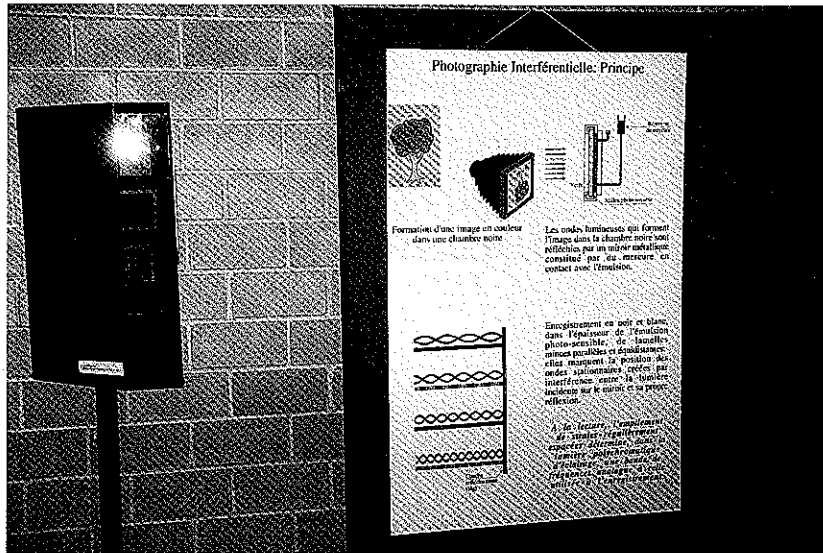
La maison natale de Gabriel Lippmann en 1997 (Luxembourg-Bonnevoie, Place du Parc, No 14); actuellement siège de la firme Guy Binsfeld & Co, conseils en communication, éditions.



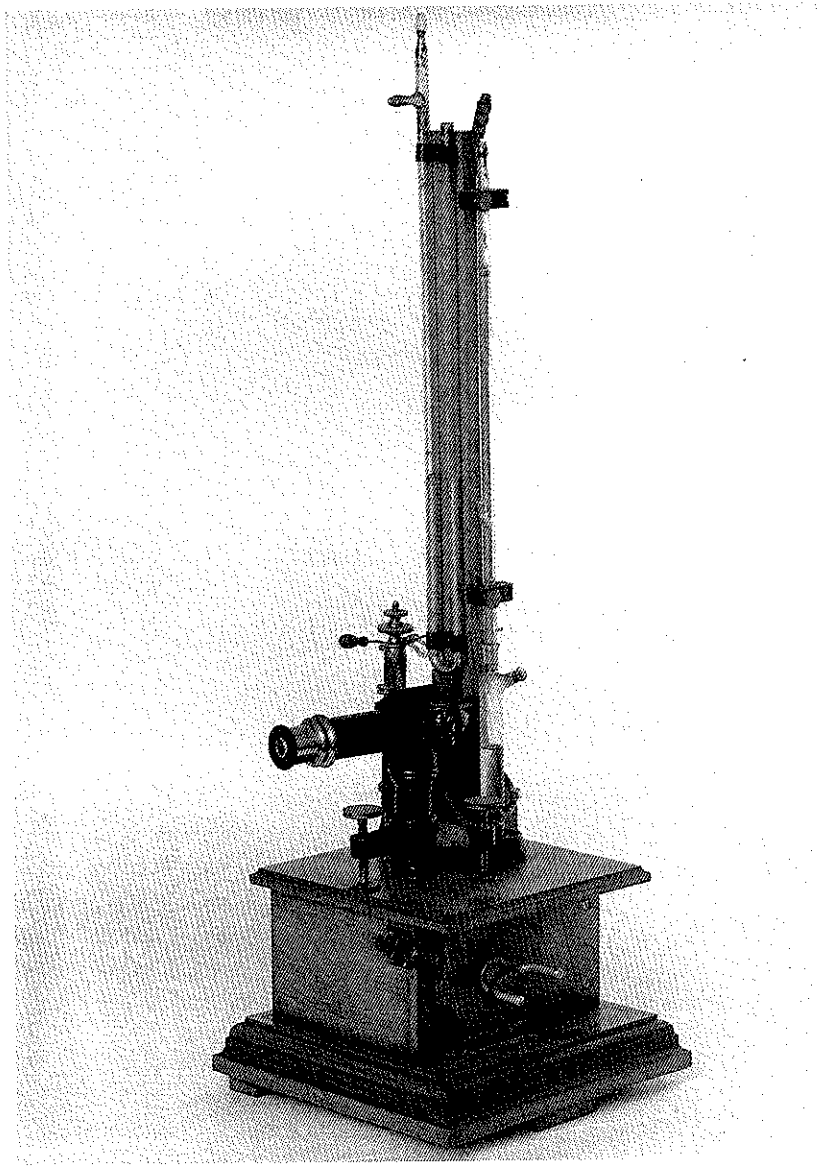
Plaque apposée le 13 avril 1984 par le Centre culturel et d'éducation populaire de Bonnevoie et la Section des sciences de l'Institut grand-ducal.



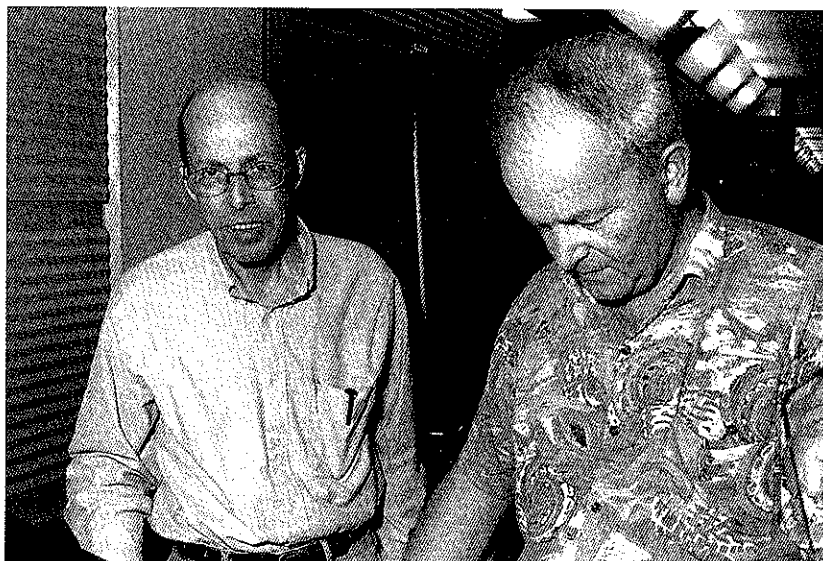
Vue partielle de l'exposition du 23 au 28 octobre 1995 au Centre universitaire de Luxembourg.



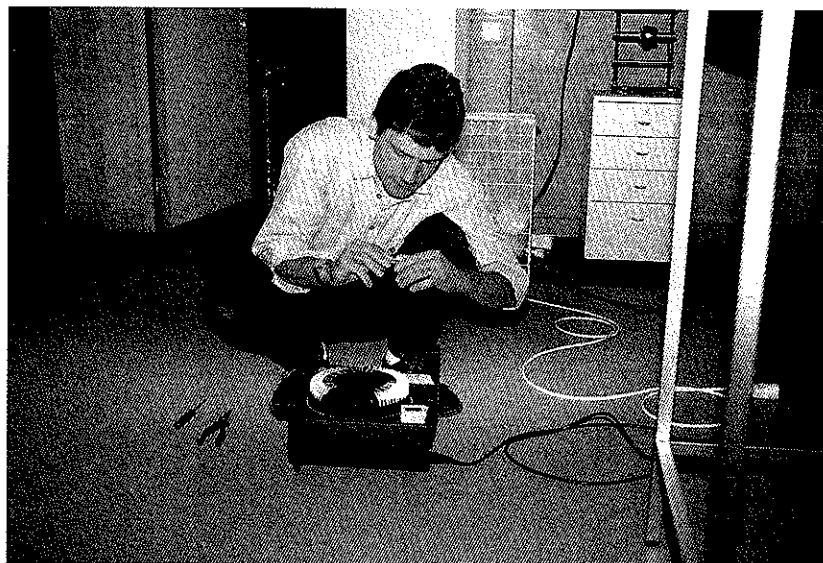
Exposition Lippmann: panneau expliquant le principe de la photographie interférentielle.



“Electromètre capillaire de Gabriel Lippmann”
Lycée de Garçons de Luxembourg
(Photo Pascal Daman).



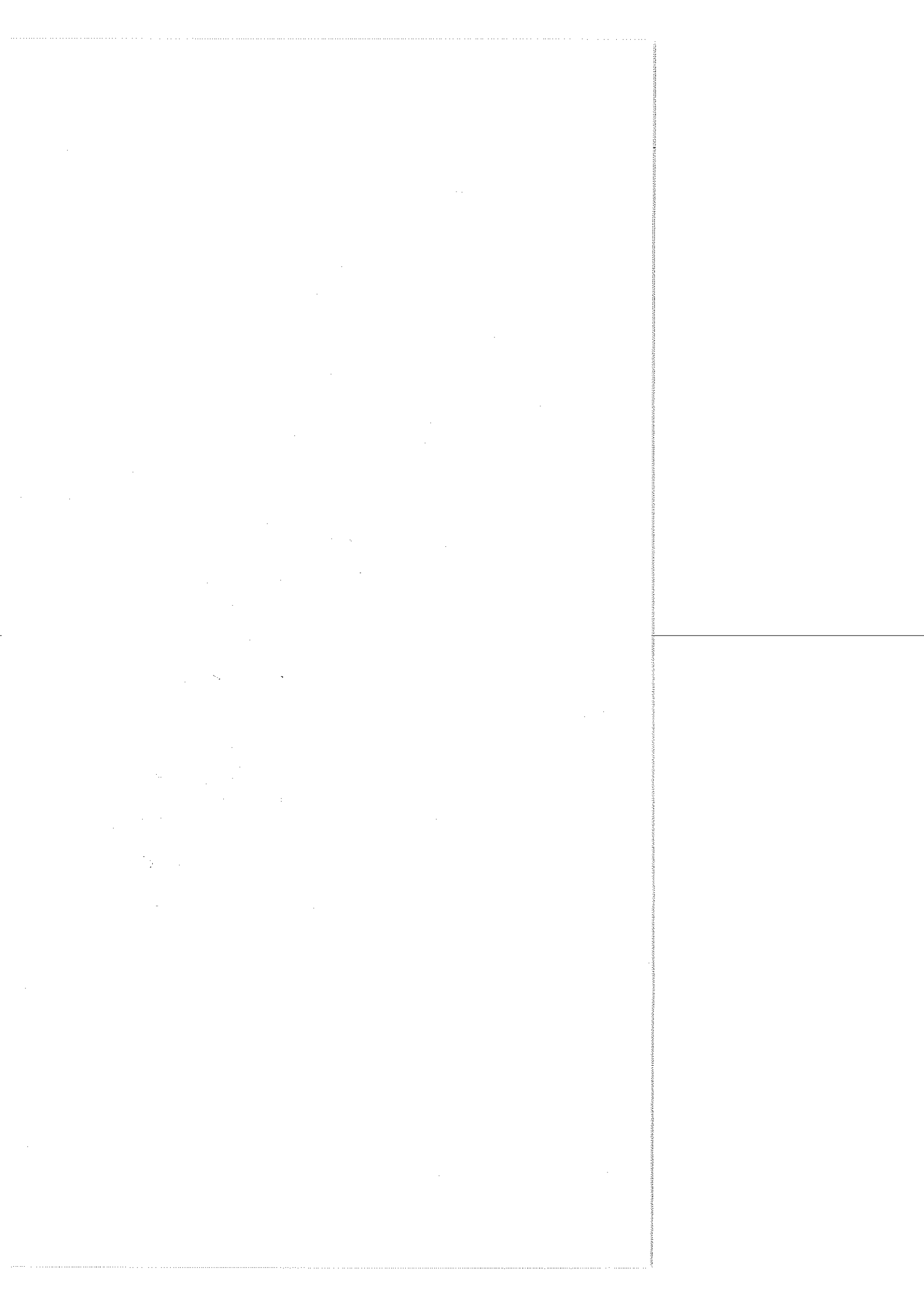
Les collaborateurs de l'exposition Lippmann:
Alain Baumann (Paris) (à gauche), Raymond Délez (Lausanne) (à droite).



Alain Herzog (Lausanne).

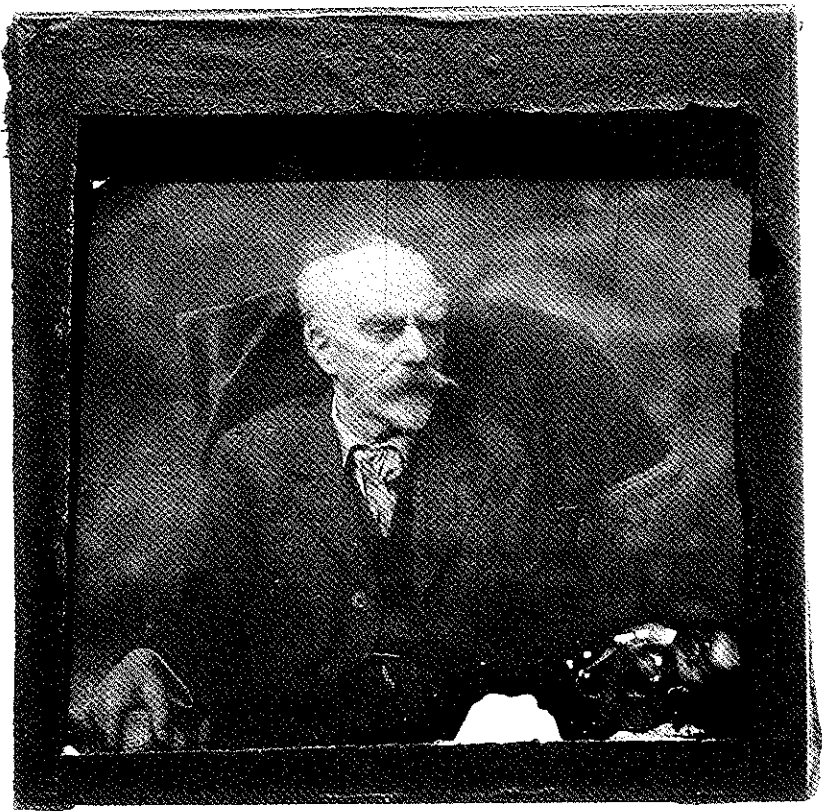


Alain Baumann (†), Jean-Marc Fournier (à droite).

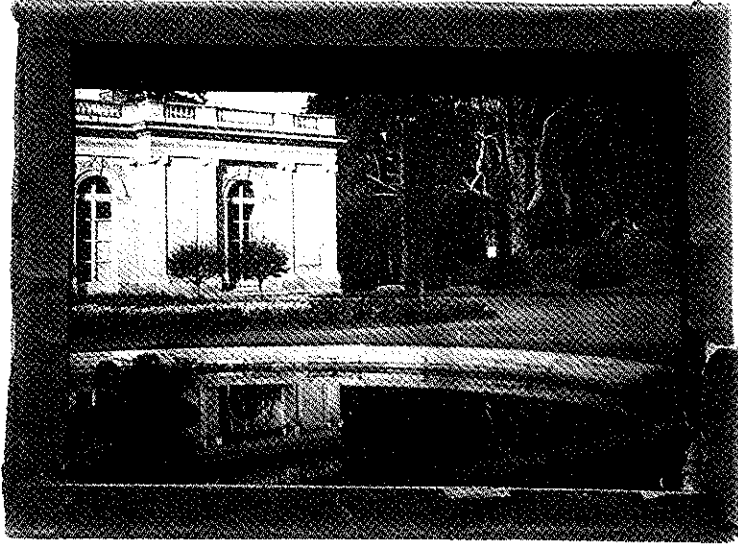


Reproductions de photographies en
couleurs réalisées par Gabriel Lippmann
vers 1892

(d'après les photographies originales conservées au
musée de l'Elysée de Lausanne)



Autoportrait de Gabriel Lippmann



Meudon



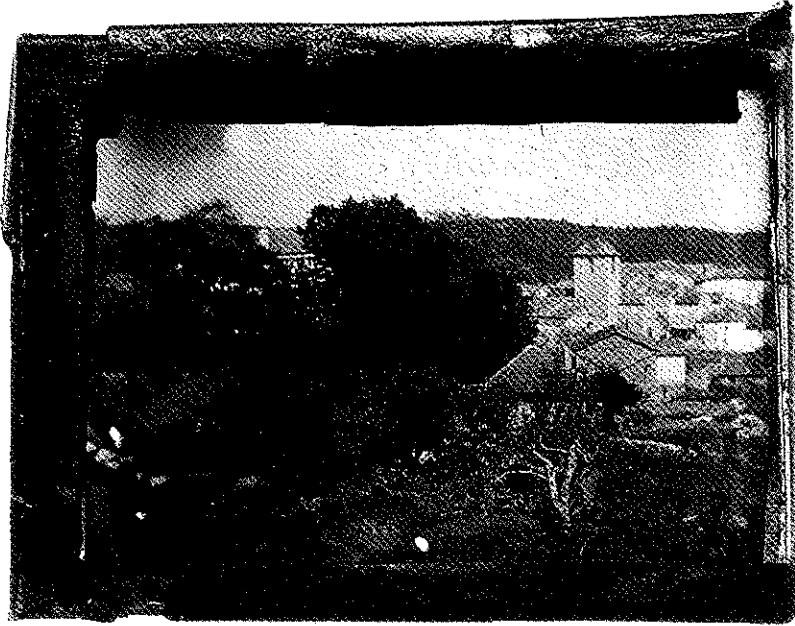
Venise



Paysages alpins



Paysages de Provence



Paysages

125



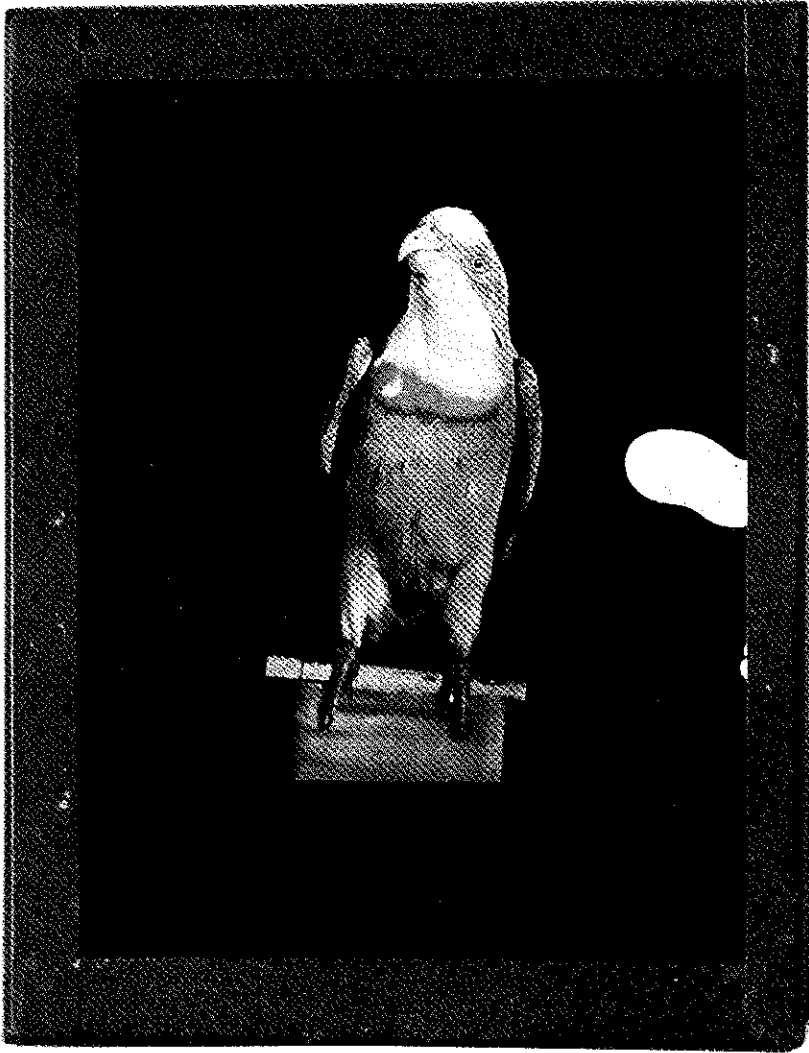
Fleurs



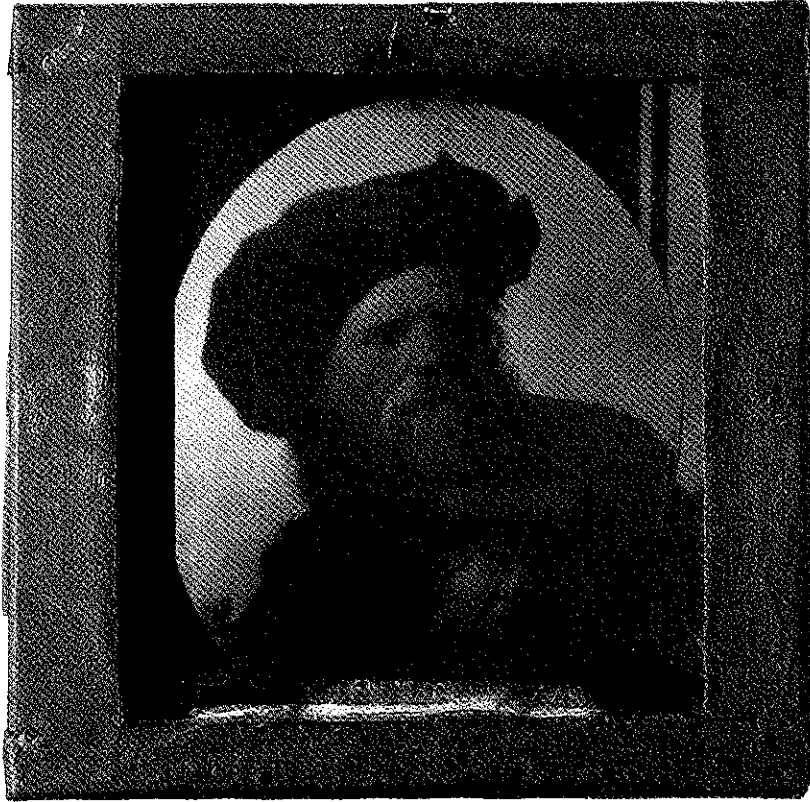
Fleurs



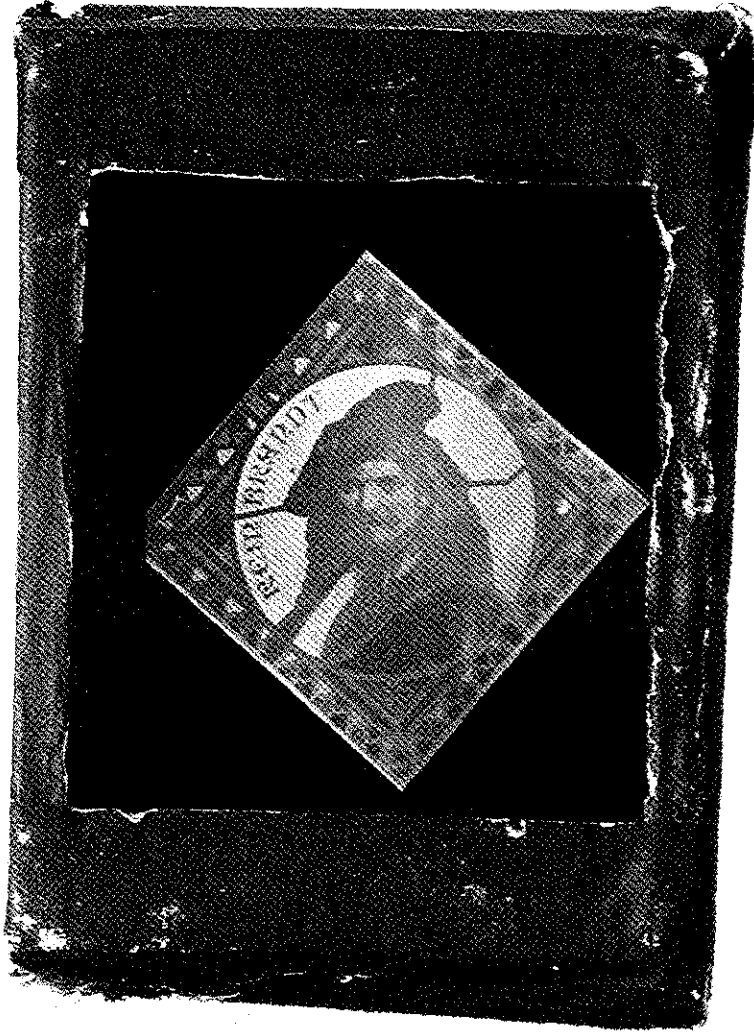
Nature morte



Perroquet



Rembrandt



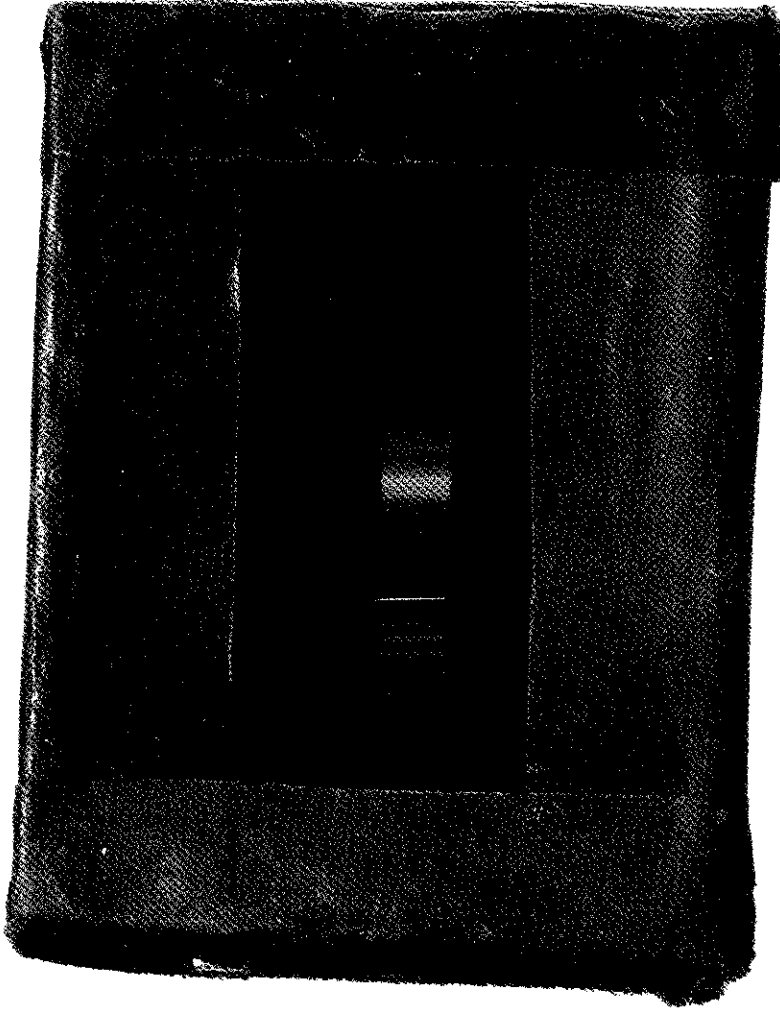
Rembrandt



Estampe



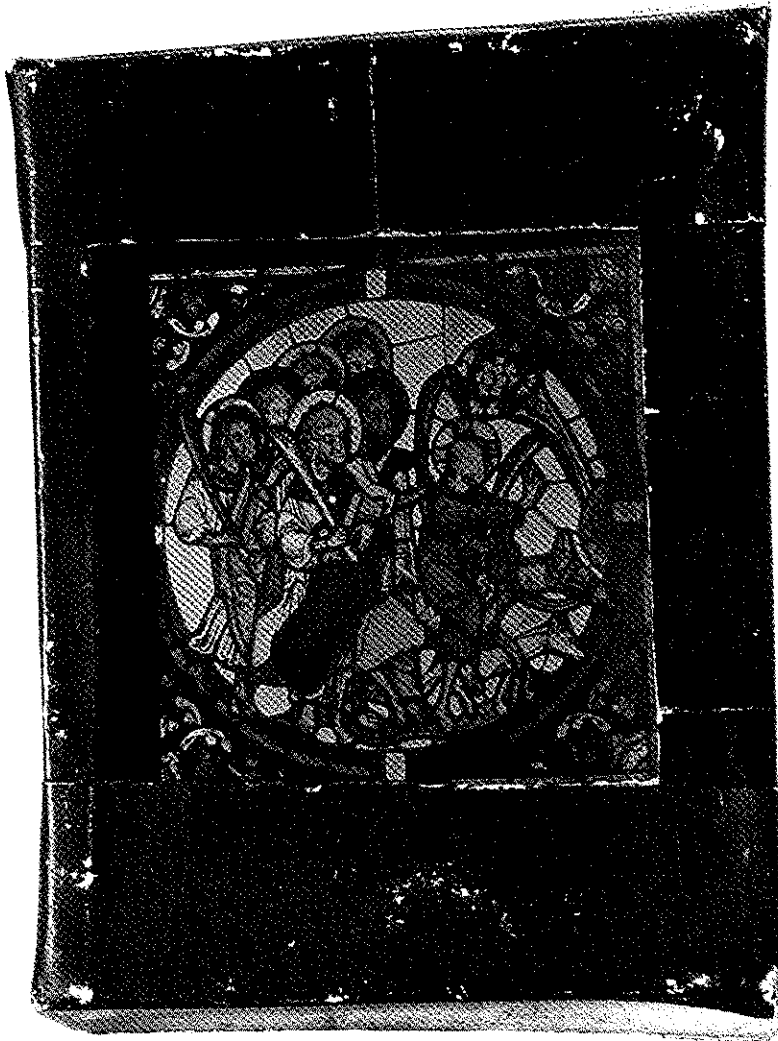
Estampe



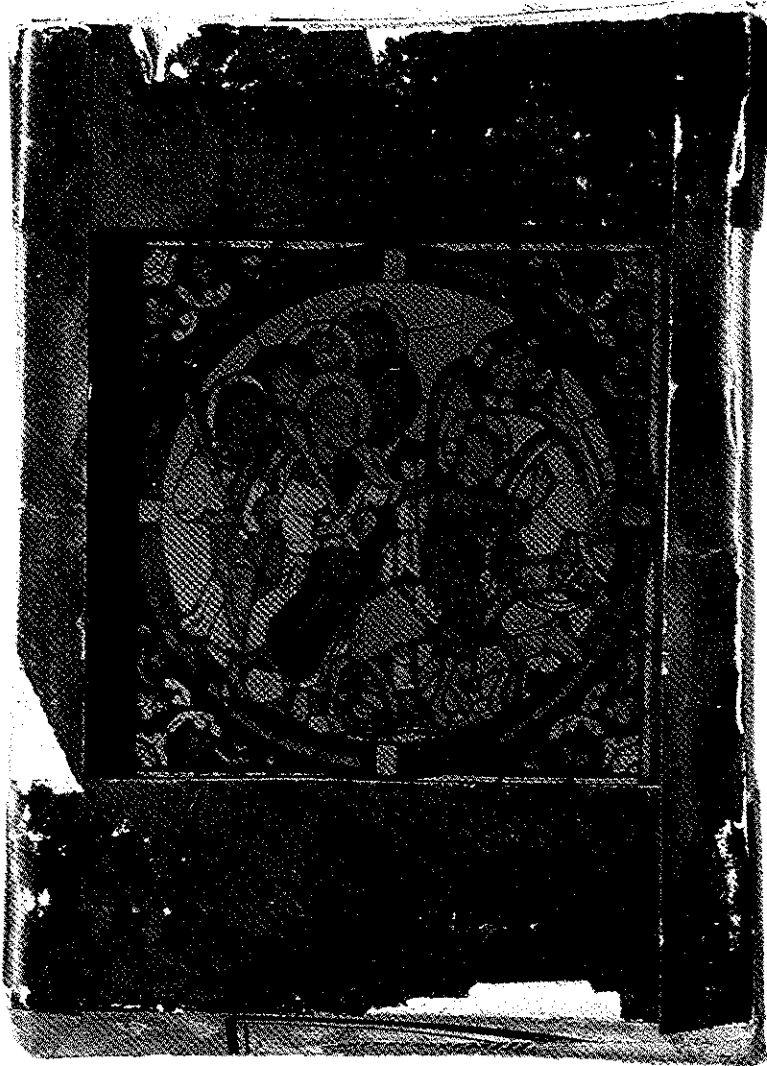
Spectre optique



Vitrail



Vitrail



Vitrail

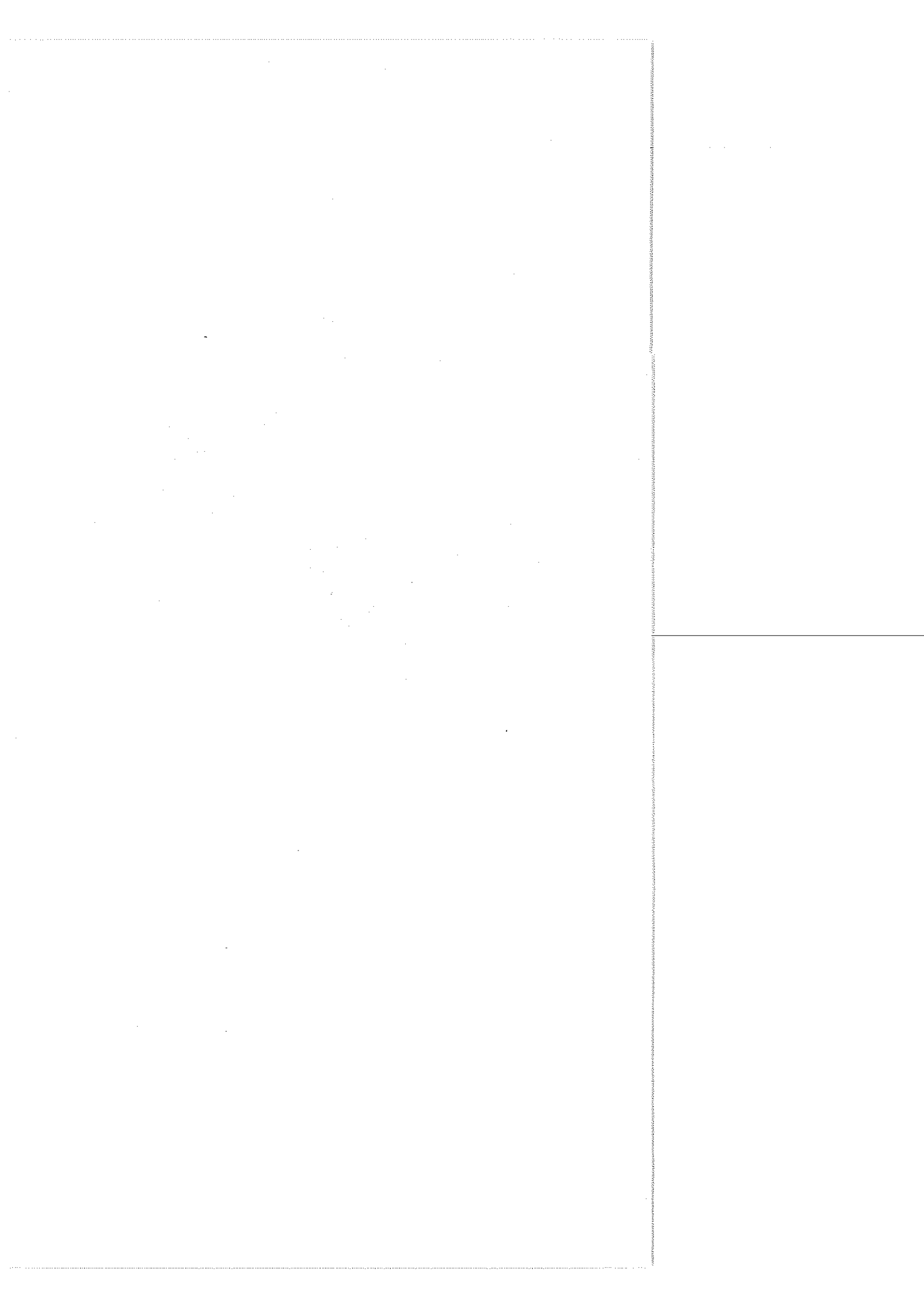


Table des matières

| | |
|---|-----|
| Avant-propos | 1 |
| Repères | 3 |
| Jacques BINTZ: Gabriel Lippmann 1845-1921 | 5 |
| Etienne GUYON: Commémoration du 150ème anniversaire de Gabriel Lippmann | 11 |
| Jean-Pierre HANSEN: Gabriel Lippmann, physicien et inventeur à la charnière de deux époques | 17 |
| Robin KAISER: Refroidissement d'atomes par laser | 25 |
| Jean-Paul PIER: L'intérêt des idées de Gabriel Lippmann pour les mathématiques | 47 |
| Jean-François POMMARET: The Mach-Lippmann analogy between heat and electricity | 59 |
| Jos. A. MASSARD: Gabriel Lippmann et le Luxembourg | 81 |
| Documentation photographique | 113 |
| Reproductions de photographies en couleurs réalisées par Lippmann .. | 121 |

