

Revue d'Histoire des Mathématiques



TEXTES & DOCUMENTS

*Les tapuscrits barcelonais
sur le problème de l'espace de Weyl*

Julien Bernard

Tome 21 Fascicule 1

2 0 1 5

SOCIÉTÉ MATHÉMATIQUE DE FRANCE

Publiée avec le concours du Centre national de la recherche scientifique

REVUE D'HISTOIRE DES MATHÉMATIQUES

RÉDACTION

Rédacteur en chef :

Norbert Schappacher

Rédacteur en chef adjoint :

Philippe Nabonnand

Membres du Comité de rédaction :

Alain Bernard
Frédéric Brechenmacher
Maarten Bullynck
Sébastien Gandon
Hélène Gispert
Catherine Goldstein
Jens Høyrup
Agathe Keller
Marc Moyon
Karen Parshall
Tatiana Roque
Dominique Tournès

Directeur de la publication :

Marc Peigné

COMITÉ DE LECTURE

Philippe Abgrall
June Barrow-Green
Umberto Bottazzini
Jean Pierre Bourguignon
Aldo Brigaglia
Bernard Bru
Jean-Luc Chabert
François Charette
Karine Chemla
Pierre Crépel
François De Gandt
Moritz Epple
Natalia Ermolaëva
Christian Gilain
Jeremy Gray
Tinne Hoff Kjeldsen
Jesper Lützen
Antoni Malet
Irène Passeron
Christine Proust
David Rowe
Ken Saito
S. R. Sarma
Erhard Scholz
Reinhard Siegmund-Schultze
Stephen Stigler
Bernard Vitrac

Secrétariat :

Nathalie Christiaën
Société Mathématique de France
Institut Henri Poincaré
11, rue Pierre et Marie Curie, 75231 Paris Cedex 05
Tél. : (33) 01 44 27 67 99 / Fax : (33) 01 40 46 90 96
Mél : rhmsmf@ihp.fr / URL : <http://smf.emath.fr/>

Périodicité : La *Revue* publie deux fascicules par an, de 150 pages chacun environ.

Tarifs : Prix public Europe : 87 €; prix public hors Europe : 96 €;
prix au numéro : 43 €.
Des conditions spéciales sont accordées aux membres de la SMF.

Diffusion : SMF, Maison de la SMF, Case 916 - Luminy, 13288 Marseille Cedex 9
Hindustan Book Agency, O-131, The Shopping Mall, Arjun Marg, DLF
Phase 1, Gurgaon 122002, Haryana, Inde
AMS, P.O. Box 6248, Providence, Rhode Island 02940 USA

TEXTES & DOCUMENTS

LES TAPUSCRITS BARCELONAIS SUR LE PROBLÈME DE L'ESPACE DE WEYL

JULIEN BERNARD

RÉSUMÉ. — En mars 1922, Hermann Weyl donne une série de huit conférences à Barcelone et Madrid sur le problème de l'espace. L'année suivante, il publie une monographie en allemand qui en reprend le contenu. En octobre 2013, nous avons redécouvert l'existence de tapuscrits à l'Institut d'Etudes Catalanes (IEC), qui contiennent des textes en français, allemand et espagnol concernant ces conférences. Ces documents ont été classés il y a quelques années par les membres de l'institut.

Dans le présent article, nous allons présenter ces documents et la chronologie des événements autour des conférences de Weyl à Barcelone, puis nous expliquerons comment ces documents ont pu rester si longtemps ignorés en dehors de l'IEC. Enfin nous approfondirons le travail d'interprétation des documents déjà accompli par les membres de l'IEC. Pour cela, il s'agira de prendre en compte le moment allemand de l'histoire du problème de l'espace

Texte reçu le 13 février 2014, révisé le 11 mai 2014, accepté le 7 novembre 2014.

J. BERNARD, Chercheur postdoctoral en philosophie, Contrat ZIF-Marie-Curie, Zukunftscolleg, University of Konstanz, Box 216, 78457 Konstanz, Germany.

Courrier électronique : julien.bernard@uni-konstanz.de

Classification mathématique par sujets (2010) : 01A60, 01A74, 83–03, 11C20, 15–03, 15A63, 15B10, 20H05, 22E05.

Mots clés : Problème de l'espace, tapuscrits français, tapuscrits espagnols, conférences de Weyl à Barcelone et Madrid, fondements de la géométrie différentielle, fondements de la relativité générale, problème de Helmholtz-Lie, Weyl, Riemann, Terradas, géométrie infinitésimale, théorie de jauge, forme quadratique, métrique pythagoricienne, groupe de Lie, algèbre de Lie, groupe orthogonal, groupe pseudo-orthogonal.

Key words and phrases. — Problem of space, French typescripts, Spanish typescripts, Weyl's conferences in Barcelona and Madrid, foundation of differential geometry, foundation of general relativity, Helmholtz-Lie's problem, Weyl, Riemann, Terradas, infinitesimal geometry, gauge theory, quadratic form, pythagorean metric, Lie group, Lie algebra, orthogonal group, pseudo-orthogonal group.

d'Hermann Weyl, et d'étudier les relations entre les tapuscrits barcelonais et les textes publiés de Weyl sur le problème de l'espace.

ABSTRACT (The Barcelona typescripts on Weyl's Problem of Space)

In March 1922, Hermann Weyl gave a series of eight lectures in Barcelona and Madrid on the "Problem of Space". The following year, he published a monograph in German which incorporates the content. In October 2013, I learnt the existence of typescripts at the Institute of Catalan Studies in Barcelona (IEC), which contain texts in French, German and Spanish about these conferences. These documents were classified a few years ago by the members of the institute.

In this article, I present these documents and I set out the chronology of the events around Weyl's conferences in Barcelona. Then, I explain why these documents have remained so long ignored outside the IEC. Finally I deepen the work of interpretation of these documents already accomplished, by including the German part of the history of Weyl's problem of space, and by studying the relationship between these new documents and Weyl's published texts on the problem of space.

1. INTRODUCTION : LES TAPUSCRITS DE L'IEC¹

En octobre 2013, alors que nous travaillions sur un projet d'édition bilingue français-allemand commentée [Weyl 2015] du texte de Weyl, *Mathematische Analyse des Raumproblems* (*MARP* par la suite), nous avons redécouvert par un heureux hasard l'existence de plusieurs tapuscrits. Ces documents sont liés aux huit conférences données par Weyl à Barcelone en mars 1922, dont le contenu de *MARP* a été issu. Ils étaient archivés dans les fonds Terradas de l'Institut d'Études Catalanes (IEC) à Barcelone, plus précisément dans le carton FET 26/2, au sein de la catégorie « D01 Activitat científica ».

L'archiviste a associé tous ces documents à l'année 1922 et les a classés en cinq chemises. Leur contenu est le suivant :

– la première chemise contient 116 pages de notes manuscrites (ainsi que des dessins et des figures), prises par Terradas lors des conférences de Weyl et d'une leçon de Sommerfeld sur la physique atomique. Les feuillets sont mélangés, écrits en français et allemand pour l'essentiel.

¹ Le présent article n'aurait pu voir le jour sans les renseignements précieux donnés par les membres de l'Institut d'Études Catalanes et l'accès qu'ils m'ont permis aux tapuscrits. Je remercie tout particulièrement Antoni Roca Rosell, Manuel García Doncel, Anna Font i Reñe et Eulàlia Miret i Raspall. Je remercie également Eric Audureau pour ses conseils et sa relecture préalable de l'article.

La très grande majorité des pages concernent la conférence de Sommerfeld. Les quelques pages concernant Weyl sont centrées autour des deux premières conférences et sont difficilement exploitables ;

- la seconde chemise contient la version que l'archiviste appelle « originale » du texte allemand de Weyl, tapée à la machine, les formules étant ajoutées à la plume. 79 pages numérotées. Le texte est parfois détérioré. Il contient l'équivalent des huit conférences de *MARP* ;

- la troisième chemise est un tapuscrit qui contient le texte rédigé en français des sept premières conférences. Il est tapé à la machine sauf pour les formules mathématiques qui sont partiellement manuscrites. Quelques pages sont détériorées ;

- la quatrième chemise contient un guide de cours de 5 pages, tapé en français à la machine. Il recouvre le contenu des cinq premières conférences, découpées en parties et sous-parties. Ce document est très détérioré ;

- la cinquième chemise contient un résumé des conférences, en espagnol, tapé à la machine. Ce document est très détérioré.

Dans le présent article, nous entendons préciser autant qu'il est possible le statut de ces documents ; c'est-à-dire que nous souhaitons déterminer qui en est l'auteur, et pour quelle fonction, quand et dans quel contexte ils ont été écrits. Pour mener à bien cet objectif, outre les documents des archives, nous disposons des travaux accomplis par Antoni Roca Rosell et Manuel García Doncel. Ces érudits, liés à l'IEC, ont participé à la première interprétation des documents qui a précédé leur archivage dans les fonds Terradas². Ils avaient déjà eux-mêmes pris parti sur le statut des documents, à partir d'un point de vue centré presque exclusivement sur le contexte espagnol des conférences de Weyl, et en particulier sur les personnalités et les institutions catalanes impliquées dans l'invitation de Weyl et d'autres savants à Barcelone.

Notre présente contribution consiste d'une part à faire connaître l'existence des tapuscrits à un public élargi, et d'autre part à diffuser en français, confirmer, et préciser le travail des membres de l'institut en l'insérant dans un contexte plus large : celui de l'histoire des textes de Weyl sur le problème de l'espace. Cela nécessitait de sortir du cadre géographique de

² Outre les informations échangées par courrier avec Roca Rosell, nous nous sommes référés à ses articles [1987 ; 1990 ; 2005a]. Concernant les conférences de Weyl à Barcelone, Roca Rosell a travaillé sur les événements et les institutions espagnoles, tandis que García Doncel a travaillé sur le contenu des documents. M. García Doncel étant à la retraite et n'ayant pas publié son travail, nous n'avons pu obtenir que quelques éléments de son travail rapportés par Roca Rosell.

l'Espagne, et du cadre chronologique du passage de Weyl dans ce pays. Le lien est ainsi fait entre les différentes publications allemandes de Weyl sur le problème de l'espace, de 1919 à 1923, et les textes produits à l'occasion des conférences à Barcelone.

2. CHRONOLOGIE DU SÉJOUR DE WEYL EN ESPAGNE³

A partir de 1915, le Conseil de Pédagogie de la Mancommunauté de Catalogne a le désir d'organiser la venue de scientifiques internationaux à la pointe de leur domaine de recherche, pour stimuler la culture scientifique catalane. Ainsi naît le programme intitulé « cours monographiques des hautes études et d'échange⁴ », permettant à des professeurs en séjour en Catalogne de donner un cours et éventuellement de le publier. La visite des scientifiques étrangers se concrétise notamment à partir de 1921 et de

³ Cette partie de l'article est basée essentiellement sur [Roca Rosell 1987]. Dans ce texte, Roca-Rosell donne ses conclusions sur le statut d'une partie des tapuscrits du carton FET26/2, en même temps qu'il étudie les circonstances et les répercussions de la venue de Weyl en Espagne. Ses conclusions s'appuient sur de nombreux documents collectés dans [Archives 2], [Archives 1], [Archives 3], les journaux de langue espagnole ou catalane de l'époque et d'autres sources secondaires comme le fichier des étudiants de l'Université de Barcelone. Il parvient à recueillir des témoignages, et à établir des conclusions précises et qui nous semblent correctement justifiées sur les points suivants :

- l'organisation administrative de la venue de Weyl à Barcelone puis Madrid,
- la nature des échanges entre Terradas, Weyl, les autres conférenciers étant venus à Barcelone dans le même cadre (notamment Levi-Civita et Einstein), et les savants ayant assistés aux conférences et aux débats qui ont suivi,
- les mesures mises en place par Terradas pour rendre la conférence de Weyl accessible à un maximum d'auditeurs,
- la publicité autour de l'événement,
- la chronologie des événements pendant les conférences elles-mêmes et autour,
- l'identité des auditeurs présents aux conférences et à la soirée de clôture,
- la réaction des journaux de l'époque pendant les conférences et dans les années qui suivent,
- la continuation par les scientifiques espagnols des débats concernant les nouvelles théories de Weyl, et les réactions d'Einstein et Pauli. Josep M. Plans est le principal protagoniste de cette continuation des débats, avec Terradas et Peña.
- l'impact de la venue de Weyl et d'Einstein sur la notoriété de Terradas et des institutions scientifiques espagnoles.

⁴ Roca Rosell explique cependant qu'il n'y a finalement pas eu véritablement d'échange, le départ des professeurs catalans à l'étranger étant difficile à réaliser du fait de la situation politique en Espagne.

la venue d'Hadamard et de Levi-Civita. Dès lors, les visites vont se succéder dans le même cadre. L'année suivante, ce sera le tour de Sommerfeld et Weyl ; en 1923 ; le tour d'Einstein [Roca Rosell 2005b].

C'est le 30 mars 1921 qu'Estéban Terradas écrit pour la première fois à Weyl pour l'inviter à donner un cours sous la forme de huit conférences [Terradas 1921]. Il joint une explication personnelle des nouvelles théories de jauge pour impressionner Weyl. Ce dernier accepte rapidement l'invitation et propose lui-même le thème de son cours. Il portera sur l'« analyse mathématique du problème de l'espace ». Il joint un programme à sa réponse. Puis il acceptera aussi de donner une seconde fois ce cours à Madrid dans un autre cadre institutionnel.

Les conférences à Barcelone sont programmées du 2 mars au 15 mars 1922 ; un repas de clôture est prévu le 18 mars, et les conférences de Madrid suivront. Mais Weyl décide de venir dès le 17 janvier en Espagne, à la fois pour des raisons de santé et pour rencontrer ses collègues et avoir des échanges scientifiques avant les conférences proprement dites⁵. Etant donné qu'il va envoyer (un ou⁶) deux article(s) sur le problème de l'espace à des revues allemandes pendant le mois de février, on imagine facilement que ces deux mois ont été consacrés par Weyl à un travail intensif sur le problème de l'espace.

On sait aussi que cette arrivée précoce de Weyl en Espagne permet à Terradas de fournir un travail impressionnant pour préparer au mieux l'auditoire à suivre le cours. Outre les démarches purement publicitaires, les invitations, etc., Terradas va rédiger des résumés en espagnol à l'usage des auditeurs comprenant mal le français, langue choisie pour les conférences. Ces résumés sont, au moins partiellement, disponibles lors des conférences elles-mêmes⁷. Selon Roca Rosell, il doit s'agir du texte retrouvé dans la chemise 5 du carton FET 26/2⁸. Enfin, Terradas donnera le

⁵ Nous le savons car Terradas envoie à Weyl une lettre à Malaga pour lui souhaiter la bienvenue en Espagne [Terradas 1922a]. Dans un document reproduit dans [Frei & Stambach 1992, 60-sq.], Weyl expose les raisons de son séjour en Espagne, et les impressions qu'il en garde. On y apprend notamment qu'il était venu en Espagne dès janvier pour des raisons de santé.

⁶ Cf. ci-dessous le problème débattu concernant l'insertion chronologique de l'article [Weyl 1923c].

⁷ C'est ce qu'on peut lire dans la lettre [Terradas 1922b] reproduite dans la note 11.

⁸ Les résumés de la chemise 5 du carton 26/2 des fonds Terradas sont incomplets. Mais d'autres archives contiennent des résumés en meilleur état : « I. El Profesor Weyl dividió su primera conferencia... », archive 3732-2, n° 135, 136, 137, 139, 140, dans [Archives 3], ref. : Roca Rosell.

1er mars une « conférence publique préliminaire au cours du Dr. Weyl » à la section téléphonique du palais de la Généralité de Catalogne⁹.

Weyl a distribué, en ouverture des conférences, un plan de cours qui correspond à celui contenu dans la chemise 4 de la boîte FET26/2¹⁰. Enfin, point important pour la détermination du statut des tapuscrits, dans une lettre à Levi-Civita contemporaine au séjour de Weyl¹¹, Terradas informe Levi-Civita du séjour passé par Weyl à Barcelone ; il précise à cette occasion qu'il a prévu de rédiger une traduction en catalan des conférences de Weyl pour ses compatriotes. Il dit que, à cet effet, Weyl lui enverra par la suite « l'original allemand ».

3. DES DOCUMENTS DIFFICILES D'ACCÈS JUSQU'EN 2005

Sans prétendre à l'exhaustivité, nous avons sélectionné un échantillon de travaux de différents types (historiques, techniques, philosophiques), à propos du problème de l'espace de Weyl¹². Pour tous ces travaux, à l'exclusion de ceux de Roca Rosell, la conclusion est la même : ses auteurs ne

⁹ « Cursos Monogràfics. Demà, primer dia de març... », archive 3732-2, n° 103, dans [Archives 3], ref. : A. Roca Rosell.

¹⁰ Le plan de cours des fonds Terradas est détérioré et ne correspond qu'aux cinq premières conférences. Cependant, quelqu'un, probablement Terradas ou Campalans, a publié un plan de cours en espagnol dans une revue [Weyl 1922d]. Il correspond tout à fait à celui des fonds Terradas et en est vraisemblablement une traduction (à moins que cela ne soit le contraire ?). L'éditeur du plan dans la revue précise qu'il s'agit du plan distribué par Weyl pendant les conférences.

¹¹ [Terradas 1922b] : Nous avons ici Mr. Le Prf. Weyl. Il nous explique sa profonde théorie sur la structure de l'espace faisant suite aux recherches de Riemann-Helmholz-Lie, et se rapportant aux nouveaux points de vue que Einstein y a introduits. Il s'exprime en langue française, l'allemand n'étant pas facile à suivre par la plupart du public. Cela fait, sans doute, que l'on éprouve quelques difficultés pour bien saisir ses idées et je suis obligé de rédiger des explications pour l'usage des auditeurs. Je me permets de vous envoyer les premières, elles pourront peut être vous intéresser. L'original allemand me sera envoyé par la suite et je pourrai en faire une traduction que je me propose de faire très librement à fin d'essayer de rendre l'explication claire et facile pour mes concitoyens.

¹² Nous remercions le Pr. Scholz qui nous a conseillé pour la constitution de la bibliographie à ce sujet. Nous avons retenu les travaux suivants ; le travail de Loinger [1988], contemporain de son travail de traduction en italien [Weyl 1991] ; les travaux dans [Scholz 2001a], et en particulier [Scholz 2001b] et [Coleman & Korté 2001] ; les autres travaux en allemand suivants [Scholz 2012], [Scholz 2004], [Scholz 1999], [Scheibe 1957], [Freudenthal 1956] et [Laugwitz 1958] ; dans le contexte anglo-saxon, nous avons retenu [Ryckman 2004] ; du côté des travaux français, outre bien sûr le travail d'Elie Cartan [1922] contemporain à celui de Weyl, nous avons retenu [Eckes 2011], une note historique dans [Michel 1992, p. 201] et [Bernard 2013, p. 285-295] ; enfin, en Espagne, le travail de Roca Rosell [1987].

semblent pas connaître l'existence des tapuscrits de l'IEC et le devenir de l'édition catalane. Seuls les textes allemands publiés par Weyl servent de référence à leurs travaux.

Cette méconnaissance des textes de Weyl sur le problème de l'espace autres que les textes allemands publiés, est à première vue étonnante. En effet plusieurs raisons suggéraient l'existence de documents en français, espagnol ou catalan. En effet, on savait que Weyl avait choisi le français comme langue de communication la plus appropriée pour ses conférences à Barcelone [Weyl 1923a, préface] [Terradas 1922b], et l'espagnol pour ses conférences à Madrid. Comme il se plaignait du poids que constitue pour lui l'usage d'un idiome étranger, on pouvait s'attendre naturellement à ce qu'il ait produit des documents en français et/ou espagnol, comme support des conférences. Quant à la version catalane, on s'attendrait à son existence tout simplement parce que Weyl l'annonce dans la préface de *MARP*. La grande majorité des textes de Weyl archivés, pour la période qui nous concerne, se trouve à l'ETH de Zurich [Archives 1]. Or, ce centre d'archives ne possède aucun manuscrit ou tapuscrit en français, espagnol ou catalan, concernant les conférences de Weyl.

C'est pourquoi, en définitive, nous sommes ramenés à devoir expliquer l'accès difficile qu'ont connus les documents de l'IEC jusqu'à une période très récente. Mais, sur ce point, l'histoire de l'institution catalane parle d'elle-même. En effet, l'archivage des documents de l'institut n'a pu démarrer que très tardivement suite aux difficultés rencontrées fréquemment par l'institut depuis sa création, en raison de la situation politique de l'Espagne jusqu'en 1976¹³. De plus, l'IEC a acquis tardivement les documents de Terradas parmi lesquels figuraient les documents qui nous intéressent¹⁴. Enfin, on doit ajouter que la plupart des pages

¹³ L'Institut d'Etudes Catalanes est une institution datant de 1907. Elle a fonctionné correctement jusqu'en 1931. A partir de là, l'institution commence à rencontrer des difficultés dans une Espagne à la situation politique difficile. A partir de la période d'occupation de Barcelone par les troupes de Franco (1939), l'institution ne tourne plus qu'au ralenti, et souvent dans la clandestinité. Ce n'est qu'à partir des années 1980 que l'institut a pu fonctionner à nouveau normalement ; étant reconnu officiellement par un décret de Juan Carlos datant du 26 novembre 1976, et retrouvant ses locaux réaménagés à partir de 1982. Cf. <http://www.iec.cat/institucio/>.

¹⁴ Terradas meurt en 1950. Il avait exprimé sa volonté de céder tous ses documents de travail à l'institut. Cependant, la veuve de Terradas refusant de céder ses documents, ils n'ont pu être récupérés qu'en 1977 après la mort de cette dernière, cédés par les héritiers. Il s'agissait de livres, de périodiques et de manuscrits/tapuscrits. Ce n'est qu'à partir de cette date qu'a pu commencer le long travail d'archivage et d'inventaire. Les livres ont été catalogués de 1983 à 1989 puis donnés en 2000 à la bibliothèque nationale de Catalogne. Ce n'est que bien après, de 2004 à 2005, que les papiers personnels de Terradas ont été définitivement ordonnés et classifiés par l'équipe

internet et documents de l'institut, dont l'inventaire du fonds Terradas, et une grande partie des travaux effectués sur les archives de l'institut, ne sont diffusés qu'en langue catalane. Cela peut se comprendre de la part d'un institut qui défend les spécificités de la culture catalane et de son investissement scientifique. Mais cela a sans doute joué un rôle dans la lenteur de la diffusion des informations vers l'extérieur.

Quant au devenir de l'édition catalane des conférences de Weyl, on sait que Terradas y travaillait toujours en janvier 1923 malgré ses nombreuses préoccupations [Terradas 1923], mais que le projet n'a pas abouti. On ne possède aucun document où les personnes impliquées s'exprimeraient sur les raisons de cet abandon. Certains facteurs en sont toutefois facilement compréhensibles¹⁵.

4. BRÈVE PRÉSENTATION DU « NOUVEAU » PROBLÈME DE L'ESPACE DE WEYL

Le problème de l'espace occupe une place très importante dans l'économie de la pensée de Weyl sur l'espace-temps. Tel que le pose Weyl dans *MARP*, il consiste à rendre compte de la *nature de la métrique* dans les espaces de Riemann $(M, g_{\mu\nu})$, et dans les espaces de Weyl $(M, g_{\mu\nu}, \varphi_\mu)$ qui les généralisent. Cela revient à justifier le type de structure infinitésimale dont

de spécialistes des archives de l'IEC. Source : Eulàlia Miret i Raspall des archives de l'IEC.

¹⁵ La version catalane des conférences de Weyl ne figure pas dans l'inventaire de la « *Col·lecció de Cursos de Física i Matemàtica* » qui devait l'accueillir à l'origine, selon les possibilités ouvertes par le programme d'échange. On y trouve pourtant bien les conférences des orateurs invités précédemment par Terradas, à savoir Levi-Civita et Hadamard.

La publication allemande de *MARP* n'est en aucune manière une raison pour abandonner le projet, puisque Terradas savait dès le début que des versions allemandes existaient, et que le projet visait précisément à rendre accessible le texte à un lecteur ne connaissant pas l'allemand. Sans doute, les éléments décisifs de l'abandon du projet sont plutôt liés aux événements dans la vie de Terradas. Celui-ci va occuper plusieurs fonctions dans les années qui suivent immédiatement les conférences. Celles-ci ont dû nécessairement ralentir son travail (projets d'ingénierie, direction de l'Institut et d'un grand laboratoire, déménagement de ses fonctions de Barcelone à Madrid ; cf. [Roca Rosell 2005a]). Enfin, à partir de 1931, la vie de Terradas et plus généralement la vie politique en Espagne est de plus en plus mouvementée. Avec son départ de l'institut et son départ pour l'Argentine en 1936, on comprend, dit Roca Rosell, que le projet de traduction en catalan, s'il n'avait pas été abandonné auparavant, était désormais devenu impossible.

En 1987, pour les 100 ans de la naissance de Terradas, l'IEC a voulu que soit reprise et achevée l'édition catalane du texte de Weyl. Il semblerait que la traduction ait été achevée mais qu'un accident ait causé la perte des documents. Cf. [Ron 1988, p. 250, note 32] où le projet d'édition de 1987 est évoqué.

on munit l'espace-temps dans la physique relativiste et dans la théorie unitaire des champs proposée par Weyl en 1918¹⁶. Plus précisément, il faut justifier que la métrique soit décrite infinitésimalement (i.e. sur l'espace tangent) par une forme quadratique non dégénérée mais non nécessairement définie, c'est-à-dire une métrique « pythagoricienne » comme le dit Weyl ; les coefficients pouvant ensuite varier d'un point à l'autre de la variété spatio-temporelle.

Weyl reconnaît dans ce problème une forme nouvelle du *problème de l'espace*, formulé pour la première fois par Riemann, et résolu de diverses manières, notamment par Riemann lui-même [1919], Helmholtz [1868] et Lie [1890]¹⁷. Cependant, la révolution opérée par les théories de la relativité d'Einstein dans les concepts de temps et d'espace amène Weyl à proposer une manière de poser le problème de l'espace et de le résoudre, profondément différente de celles de Riemann et d'Helmholtz-Lie, tant du point de vue des prémisses acceptées que des méthodes mathématiques employées. C'est pourquoi il est important de distinguer ce « nouveau problème de l'espace » de Weyl de ceux de ses prédécesseurs, et du problème de Riemann-Finsler à propos duquel Weyl avait élaboré des conjectures personnelles lors de son travail d'édition¹⁸.

Au printemps 1921, Weyl parvient à achever sa propre manière de poser le nouveau problème de l'espace et de le résoudre. Inspiré à la fois par une réflexion sur les théories d'Einstein et sur l'histoire de la géométrie, et par une prise de position philosophique sur l'espace¹⁹, Weyl adopte deux prémisses étroitement corrélées. Il s'agit d'une part du *principe de liberté*, qui exprime la libre variabilité de la métrique quand on parcourt la variété spatio-temporelle, conformément au caractère dynamique de la métrique en relativité générale ; et d'autre part du *principe de détermination univoque de la connexion affine par la métrique* (une fois la métrique fixée au sein du champ des possibles ouverts par le seul choix de sa « nature »).

¹⁶ Cf. notamment [Weyl 1918b] et [Weyl 1918c].

¹⁷ Pour une discussion détaillée du traitement du problème de l'espace par ces trois auteurs, ainsi qu'une traduction des textes de Lie afférents, le lecteur pourra se référer à [Merker 2010]. Cf. aussi [Torretti 1978].

¹⁸ [Riemann 1919], [Riemann 1921] et [Riemann 1923].

¹⁹ Il existe une littérature abondante sur les prises de positions philosophiques de Weyl sur l'espace, et sur les principales sources d'inspiration philosophique qui ont été les siennes (Kant, Husserl, Fichte, Leibniz) et qu'il n'a toujours intégrées à sa propre pensée qu'avec un recul critique. On pourra se rapporter notamment à [Bernard 2013], [Mancosu & Ryckman 2002], [Mancosu & Ryckman 2005], [Ryckman 2004], [Sieroka 2007], [Sieroka 2008], [Sieroka 2009] et [Weyl 2015, introduction].

La technique mathématique employée par Weyl consiste à exprimer ces deux prémisses sous la forme de contraintes imposées à ce qu'il appelle le « groupe infinitésimal des rotations », et qui correspond à ce nous appellerions plutôt aujourd'hui l'algèbre de Lie²⁰ associée au groupe des transformations linéaires congruentes agissant sur l'espace tangent à la variété.

Une fois ces contraintes exprimées, la philosophie cède la place entièrement aux mathématiques, puisque le problème de l'espace est ramené à un théorème de théorie des groupes stipulant que l'algèbre de Lie répondant aux contraintes est nécessairement celle associée au groupe pseudo-orthogonal²¹ $O^+(p, q)$, avec $n = p + q$, caractéristique d'un espace muni d'une métrique pythagoricienne. Nous nous référerons par la suite à ce théorème simplement comme *le théorème de Weyl*.

THÉORÈME DE WEYL²². — *Si une sous-algèbre de Lie G de l'algèbre $\mathfrak{gl}(n)$ des matrices carrées $n * n$ vérifie :*

- (1) *G est de dimension $\frac{n(n-1)}{2}$;*
 - (2) *on ne peut collecter n matrices $a_{1,s}^i, \dots, a_{n,s}^i$ de G (non toutes nulles) pour former une bimatrice $a_{r,s}^i$ symétrique en (r, s) ,*
 - (3) *et la trace des matrices de G est nulle (hypothèse dispensable pour $n > 2$),*
- alors G est nécessairement l'algèbre de Lie associée au groupe des transformations linéaires préservant une certaine forme quadratique Q non dégénérée.*

5. RELATIONS ENTRE DES CONFÉRENCES DE BARCELONE ET LES TEXTES PUBLIÉS PAR WEYL SUR LE PROBLÈME DE L'ESPACE

Les deux aspects techniques et philosophiques de ce nouveau problème de l'espace ont été l'objet d'un travail intense de Weyl pendant les années 1920–1923. Le premier texte à être publié le concernant est le paragraphe 18 d'*Espace, Temps, Matière*, inséré dans la quatrième édition [Weyl 1921a, p. 124–134]. Ce texte contient : l'énoncé du problème dans le langage de la théorie des groupes, la donnée des axiomes choisis par Weyl pour déterminer la nature de la métrique, et enfin l'énoncé du théorème de Weyl (sans démonstration). Quelques éléments philosophiques très sommaires

²⁰ Le terme sera introduit par Weyl lui-même, et son assistant Nathan Jacobson, en 1934. Cf. les références dans [Scholz 2014] et le commentaire dans [Eckes 2014].

²¹ Weyl n'emploie pas encore la notation $O^+(p, q)$ à l'époque de *MARP* mais introduira lui-même la plupart des notations modernes des groupes classiques dans [Weyl 1939].

²² Nous nous sommes permis ici l'abus consistant à identifier les applications linéaires avec leurs représentations numériques (matrices).

viennent justifier la pertinence du problème et le choix des axiomes. Ce premier texte dont nous disposons atteste de l'avancée à peu près simultanée de Weyl sur l'aspect technico-mathématique, et sur l'aspect philosophique du problème. De plus, la traduction en français de cette quatrième édition [Weyl 1922e] a joué un rôle important dans la réception en France de ce problème, en particulier chez Elie Cartan²³. Nous pouvons dater précisément de la période mars-avril 1921 l'achèvement par Weyl de la première preuve complète de son théorème²⁴.

En avril 1921, Weyl dépose au *Mathematische Zeitschrift* la rédaction complète d'une preuve de son théorème [Weyl 1922a]. Les aspects philosophiques et historiques y sont réduits à quelques pages. Cependant, en septembre 1921, Weyl donne une conférence à Iéna qui se centre au contraire sur les aspects philosophiques et historiques du problème. Un résumé d'une page de cette conférence sera publiée en 1921 par le *Jahresbericht der Deutschen Mathematiker-Vereinigung* [Weyl 1921b], tandis qu'une version complète de cette conférence sera déposée par Weyl le 1er février 1922 au même journal [Weyl 1922b]. Ce dernier article est complémentaire de l'article mathématique puisqu'il s'arrête à l'énoncé du théorème de théorie des groupes. D'après la date de soumission, c'est bien depuis l'Espagne que Weyl a envoyé cet article, alors qu'il était dans une phase intense de rédaction concernant le problème de l'espace, ayant en vue des conférences de Barcelone. De fait, cet article est le plus proche par son contenu des premières conférences de *MARP*.

Enfin, après être revenu d'Espagne, Weyl s'attachera encore à simplifier son théorème en vue de la publication allemande de *MARP*. Cet ouvrage se donne comme une version allemande des conférences à Madrid et Barcelone. Weyl dit dans la préface de *MARP* que l'ouvrage allemand reprend

²³ Cf. [Cartan 1922], [Scholz 2012] et [Coleman & Korté 2001].

²⁴ En effet, la quatrième édition d'*Espace, Temps, Matière* était achevée en novembre 1920 comme en atteste la préface. A cette époque, Weyl ne disposait d'une preuve complète de son théorème que pour les cas des dimensions $n = 2$ et $n = 3$ [Weyl 1921a, p. 133]. Les 26–27 mars 1921, Weyl écrit de Zuoz une lettre à Husserl [Weyl 1921d, p. 232] où il lui raconte qu'il s'est efforcé ces derniers temps de résoudre son nouveau problème de l'espace. Il ne présente donc pas encore son travail comme achevé. Etant donné qu'une preuve complète est envoyée au *Mathematische Zeitschrift* le 24 avril, on peut supposer que le théorème de Weyl a été prouvé complètement entre le 26 mars et le 24 avril 1921. D'autre part, dans le tapuscrit français de la chemise 3, on lit : « j'ai trouvé une solution affirmative "à mon problème de l'espace" il y a environ un an » [Weyl 1922f, p. 68]. Si le tapuscrit est bien daté des conférences à Barcelone (mars 1922), la chronologie est cohérente. Par contre, curieusement, on retrouve la même phrase (en allemand) dans *MARP* [Weyl 1923a, p. 47], comme si Weyl n'avait pas pris soin de prendre en compte les mois qui s'étaient écoulés entre des conférences à Barcelone et la publication de *MARP*.

« presque mot à mot » les conférences espagnoles, sauf pour la huitième conférence qui a dû être remaniée en raison de la simplification du théorème de Weyl qui a eu lieu entre temps²⁵. Nous confirmons que le texte du tapuscrit français de la chemise 3 est très proche, paragraphe par paragraphe du texte de *MARP*²⁶.

Aussi bien le tapuscrit français de la chemise 3 que son homologue allemand *MARP*, pour ce qui est du contenu philosophique et historique, reprennent l'article « Raumproblem » (et donc en partie au moins la conférence de Iéna). La preuve du théorème de Weyl étant mise pour l'instant de côté, la partie technique du texte aborde notamment les thèmes suivants : 1) une présentation axiomatique de la géométrie de Minkowski qui met en avant la constitution de la métrique à partir des structures conformes (cônes de lumière) et projectives (inertie des points matériels), 2) une présentation générale de la géométrie infinitésimale pure et des principaux objets projectifs, conformes, affines et métriques que l'on peut y définir, 3) une présentation des solutions de Riemann, et d'Helmholtz-Lie à leurs propres problèmes de l'espace, enfin 4) une présentation des outils nécessaires à la démonstration du théorème de Weyl : groupes et algèbres de Lie²⁷, théorème d'existence et d'unicité des solutions aux équations différentielles totales, et théorie de la décomposition canonique des applications linéaires avec son application à l'étude d'une algèbre de Lie de matrices²⁸).

Bien que la plupart de ces thèmes fussent déjà présents dans les deux articles techniques au *Mathematische Zeitschrift*, on doit remarquer que de

²⁵ La huitième conférence est liée au théorème puisque son but est d'en démontrer une version affaiblie. Weyl ajoute une hypothèse supplémentaire à son théorème : la présence d'une matrice antisymétrique de rang 2 dans notre algèbre de Lie, définie par $S_{ij}^{(12)} = \delta_{i1}\delta_{j2} - \delta_{i2}\delta_{j1}$ (où δ est le symbole de Kronecker). Il démontre alors que, dans le bon système de coordonnées, l'algèbre de Lie caractérisée comporte exactement toutes les matrices antisymétriques. Dans *MARP*, cette preuve affaiblie du théorème sert d'étape pour la preuve complète qui est donnée dans le dernier appendice.

²⁶ Le parcours du tapuscrit français en parallèle avec le texte de *MARP* confirme que, à quelques déplacements de paragraphes près, les phrases se répondent bien. C'est pourquoi le tapuscrit français n'apporte pas de nouveauté quant au contenu proprement *mathématique* des conférences. En revanche, les différences de formulations concernant certaines phrases des parties *philosophiques* de l'ouvrage peuvent apporter un éclairage tout à fait intéressant sur les conférences. C'est ce que nous montrerons dans les notes incorporées à [Weyl 2015].

²⁷ Weyl les appelle encore respectivement des « groupes » et des « groupes infinitésimaux » de transformations.

²⁸ Dans sa présentation de la mise sous forme canonique des transformations linéaires, Weyl croise les pratiques issues de la tradition de Weierstrass, et celles issues de Jordan au sens de [Brechenmacher 2007].

nombreux aspects ont été éclaircis et développés par Weyl, notamment dans les 12 appendices qui composent la deuxième partie de *MARP*. Weyl y a en effet incorporé une partie des travaux de géométrie infinitésimale qu'il avait publiés dans des articles spécialisés connexes²⁹.

Il y a cependant une différence importante concernant ces aspects techniques entre le tapuscrit français de la chemise 3 et le texte de *MARP* ; à savoir l'absence des douze appendices dans le tapuscrit français³⁰. Mais cette absence ne fait que confirmer ce que Weyl annonce dans la préface de *MARP*, à savoir qu'il a ajouté dans la version allemande, aux conférences espagnoles proprement dites, ces appendices pour approfondir des points techniques ou compléter certaines démonstrations qui n'avaient pu être développées pleinement en Espagne, à cause de la contrainte de temps³¹.

Enfin, la différence la plus importante entre *MARP* et le contenu des conférences espagnoles proprement dites devait concerner la preuve du théorème de Weyl. Dans la préface de *MARP* et au début de l'appendice 12, on lit que la démonstration du théorème a été grandement simplifiée, à la fois depuis la preuve initiale de [Weyl 1922a] et depuis les conférences à Barcelone. Mais on ne peut rien en déduire quant au fait que la démonstration présentée lors des conférences elles-mêmes serait exactement celle de [Weyl 1922a] ou plutôt une version intermédiaire entre [Weyl 1922a] et [Weyl 1923a]. Malheureusement, comme nous l'avons annoncé en introduction, le tapuscrit français de la chemise 3 ne contient pas la huitième conférence, et une vérification directe est donc impossible.

²⁹ Weyl avait étudié dans [Weyl 1922c] les sous-variétés d'une variété métrique. Cela intervient dans *MARP* p. 10–11. D'autre part, il avait étudié la manière de traiter les structures conformes et projectives en géométrie infinitésimale dans [Weyl 1921c]. Weyl se sert très souvent de ces dernières analyses dans *MARP* : 1) pour démontrer en géométrie infinitésimale le théorème de détermination de la métrique par les structures conformes et projectives, 2) pour en proposer une interprétation physique intéressante pour la relativité générale, 3) pour étudier les espaces à courbure constante, et 4) pour développer la solution de Helmholtz-Lie au problème de l'espace. Notons que ces articles sur des points très spécialisés viennent s'ajouter aux articles plus généraux de Weyl sur la géométrie infinitésimale, et surtout [Weyl 1918b] et [Weyl 1918c].

³⁰ Le tapuscrit [Weyl 1922f, p. 73] finit, après l'énoncé du théorème de Weyl, sur ces mots « Je veux employer la dernière heure de mon cours à vous donner l'idée essentielle de la démonstration. ». Cela correspond exactement aux derniers mots de la septième conférence dans [Weyl 1923a, p. 51].

³¹ Aussi bien dans le tapuscrit de la chemise 3 que dans *MARP*, Weyl emploie souvent des expressions comme « durant la prochaine heure », pour désigner manifestement la conférence suivante. Cf. par exemple la citation de la note précédente. Ainsi, les huit conférences espagnoles devaient durer 1 heure chacune, ce qui est peu au vu de l'ampleur du contenu abordé.

Il reste cependant un dernier article de Weyl sur le problème de l'espace que nous avons laissé volontairement de côté car son statut chronologique pose problème. En effet, Weyl a écrit un second article technique dans le *Mathematische Zeitschrift*, intitulé « Zur Charakterisierung der Drehungsgruppe » [Weyl 1923c], traitant de son théorème. Or, quand on consulte la notice qui suit l'article, l'éditeur indique « soumis le 17 février 1922 ». A priori, cette date est tout à fait crédible puisqu'elle correspond exactement à la période de présence de Weyl en Espagne, alors que ses recherches étaient centrées sur le problème de l'espace. Cet article semble la seule trace que nous possédions concernant l'état de la preuve du théorème de Weyl au printemps 1922. Mais une analyse du contenu de l'article démontre que ce n'est pas une source fiable concernant cette période³².

6. CONCLUSIONS SUR LE STATUT DES DOCUMENTS DE L'IEC

Concernant les documents des chemises 1, 4, et 5, nous n'avons rien apporté de plus par rapport au travail de Roca Rosell. En revanche, nous pouvons apporter des précisions sur le document 3 et quelques doutes sur le statut du document 2.

Concernant la chemise 3, Roca Rosell et García Doncel présentent son contenu comme étant le tapuscrit ayant de servir de support aux sept premières conférences de Weyl. Ils se basent essentiellement sur la lettre de Terradas à Levi-Civita où le physicien espagnol nous apprend que Weyl avait choisi le français pour s'exprimer³³.

Les informations que nous avons rapportées confirment cela et apportent quelques précisions. La prise en compte des dates de soumission

³² En effet, on y lit à la fin du paragraphe I :

Dans l'appendice 12 de R « *Mathematische Analyse des Raumproblems* », j'ai remplacé la première preuve « du théorème de théorie des groupes », parue dans le *Mathematische Zeitschrift*, 12 (1922), p. 114-sq., par une preuve essentiellement plus simple. C'est à cette dernière que se rapportent les recherches qui suivent. (notre traduction)

Ainsi, le contenu de l'article concerne la preuve simplifiée finalement présentée dans *MARP*. Ce décalage chronologique est-il dû à une erreur d'impression dans le *Mathematische Zeitschrift*? Faut-il lire plutôt que Weyl a soumis l'article le 17 février 1923? C'est difficile à dire. Etant donné que la date du 17 février 1922 coïncide avec la période de présence de Weyl en Espagne, et étant donné que nous n'avons aucune raison de douter de l'indication de l'éditeur, nous préférons supposer que la date de soumission est correcte mais que Weyl a décidé de remanier son article entre le moment de sa soumission à la revue et le moment de sa publication, pour adapter son article à la nouvelle preuve. Quelque soit l'hypothèse retenue, l'article [Weyl 1923c] est invalide pour juger de l'état de la démonstration du théorème de Weyl au printemps 1922, et nous nous trouvons alors sans source fiable à ce sujet.

³³ Ce dernier point est confirmé par [Weyl 1923a, préface].

des articles aux revues allemandes montre que Weyl a consacré son séjour espagnol au problème de l'espace en se concentrant, selon l'ordre même des conférences, d'abord sur la présentation philosophique et historique du problème de l'espace (soumission de [Weyl 1922b] le 1^{er} février 1922), puis sur l'aspect technique de son théorème (soumission de [Weyl 1923c] le 17 février 1922). Les conférences de Barcelone vont reprendre tout le contenu de l'article [Weyl 1922b] en y intégrant de nombreux développements mathématiques déjà connus à visée pédagogique³⁴ (cf. les points énumérés p. 16). Les contraintes de temps imposées pour les conférences et l'aveu de Weyl de ne pas être à l'aise avec les langues étrangères, rendent très probable la nécessité pour Weyl de disposer d'un texte déjà rédigé en français qu'il n'aurait plus qu'à lire ou réciter pendant les conférences. Or, il ne restait au mieux que trois semaines à Weyl après la soumission des articles allemands pour les compléter et les traduire (ou les faire traduire ?). Le texte du tapuscrit de la chemise 3 est écrit dans un français très approximatif, tant du point de vue de la syntaxe que du vocabulaire, et on y trouve d'innombrables coquilles et fautes d'orthographe et de grammaire³⁵. Cela semble correspondre tout à fait à un texte écrit dans la précipitation par une personne ne maîtrisant pas le français ; sans doute Weyl lui-même, aidé ou non par ses collègues catalans. Enfin, notre analyse de la chronologie liée aux textes allemands montre que l'absence de la huitième conférence dans le tapuscrit français est d'autant plus regrettable qu'aucun autre texte publié de la même période ne peut compenser ce manque et nous renseigner sur l'état de la preuve du théorème de Weyl pendant son séjour en Espagne.

Concernant le document de la chemise 2, l'archiviste de l'IEC le désigne comme « travail original de Weyl », sans préciser ce qu'il faut entendre par là. Roca Rosell, parce qu'il s'intéresse surtout au contexte espagnol des conférences de Weyl, ne parle presque pas du tapuscrit allemand. Cependant, dans sa lettre à Levi-Civita, Terradas rapportait que Weyl lui avait promis de lui envoyer plus tard l'« original allemand », pour servir à sa traduction catalane. Il est clair que Terradas ne pouvait désigner par ces mots *MARP*, qui n'était pas encore d'actualité. Parlait-il du tapuscrit classé dans

³⁴ Par exemple, dans le tapuscrit [Weyl 1922f, p. 25], Weyl expose son intention pédagogique à propos de la géométrie infinitésimale : « Ce sont aujourd'hui des résultats bien connus. J'ai seulement voulu vous donner une courte esquisse de la géométrie infinitésimale ».

³⁵ Il suffit pour s'en convaincre de lire la seconde phrase du tapuscrit : « Un coirps puet sans changer sa constitu ion en soi, s'est à dire, restant ce qu'il est, être tout aussi bien ici qu'en un autre endroit de l'espace. » [Weyl 1922f, p. 1].

la chemise 2 ? Weyl a-t-il produit un texte pour les conférences, entièrement rédigé en allemand, avant de le traduire en français ? C'est ce que suggère l'archiviste en l'appelant « travail original de Weyl ». C'est aussi ce que suggère Weyl lui-même, dans la préface de *MARP*, en disant que le texte des conférences a été *retraduit* « rückübersetzt » en son allemand bien aimé. L'absence des appendices dans le tapuscrit de la chemise 2 plaide aussi en faveur de l'hypothèse d'un texte précoce par rapport à *MARP*.

Cependant, la prise en compte des textes allemands publiés nous permet, non pas de réfuter cette hypothèse, mais au moins d'émettre quelques doutes à son propos. Une autre hypothèse est possible : que les « originaux allemands » promis par Weyl à Terradas correspondent aux articles allemands qu'il avait rédigés pendant son séjour en Espagne ; quelque chose comme la concaténation des articles [Weyl 1922b] et [1923c]. Dans ce cas, le tapuscrit de la chemise 2 pourrait très bien être un texte envoyé ultérieurement par Weyl pendant l'année 1922, ou dans les premiers mois de 1923, alors qu'il travaillait sur *MARP*.

Le seul moyen d'éclaircir la question nous semble de comparer la huitième conférence du tapuscrit allemand de la chemise 2 avec la huitième conférence de *MARP*. Rappelons en effet que, d'après Weyl, la huitième conférence a été profondément modifiée entre les conférences à Barcelone et la publication de *MARP*, pour répondre à la simplification opérée sur la démonstration de son théorème. La comparaison des deux documents montre que, en dépit de nombreuses phrases identiques, les textes diffèrent bien. Certains paragraphes sont déplacés. Certains contenus présents dans l'un sont absents dans l'autre³⁶. Mais on retrouve globalement la même architecture de preuve. Aussi, cela n'est pas en parfaite adéquation avec l'affirmation de Weyl comme quoi la huitième conférence aurait subi un *réaménagement en profondeur* « durchgreifende Umänderung » entre

³⁶ Les deux premières pages de la huitième conférence du tapuscrit [Weyl 1922g, p. 69–71] reprennent presque mot à mot les deux premières pages de [Weyl 1923a, p. 51–53]. Cependant, le paragraphe de *MARP* qui débute au milieu de la p. 53 par les mots « Für die *niederste Dimensionszahl* $n = 2$ [...] », et qui traite directement le théorème de Weyl pour le cas $n = 2$ ne figure pas dans [Weyl 1922g, p. 71]. La raison pour laquelle Weyl traite ce cas à part dans *MARP* (alors que le reste de la démonstration se fait à partir d'un nombre de dimensions n générique) tient au fait que Weyl démontre dans *MARP* que l'hypothèse de la trace nulle des matrices, pour démontrer le théorème, est dispensable pour les cas $n > 2$. Le cas $n=2$ demande alors un traitement à part. L'autre différence importante est la présence d'une considération combinatoire [Weyl 1922g, p. 74–75] sur la dimension du sous-espace vectoriel obtenu quand, en partant de l'algèbre de Lie étudiée dans le théorème, on impose d'annuler r colonnes et s lignes de la matrice générale. Une considération équivalente n'intervient dans *MARP* que dans l'appendice 12 mais non pas dans la huitième conférence.

les conférences de Barcelone et la publication de *MARP*. Cela suggère un texte postérieur aux conférences.

SOURCES D'ARCHIVES

[Archives 1] Hermann Weyl (1885–1955), Prof. für höhere Mathematik ETH Zürich, Verzeichnis der Manuskripte und Korrespondenzen, *Handschriften und Autographen der ETH-Bibliothek*.

[Archives 2] Fons Terradas, Arxiu dels membres de l'IEC, Arxiu de l'IEC, http://www.iec.cat/arxiu/membres_q.asp?id=80.

[Archives 3] Arxiu de la Diputació de Barcelona, <http://www.diba.cat/en/web/arxiu/inici>.

RÉFÉRENCES

BERNARD (Julien)

[2013] *L'idéalisme dans l'infinitésimal, Weyl et l'espace à l'époque de la relativité*, Paris : Presses Universitaires de Paris Ouest, 2013.

BRECHENMACHER (Frédéric)

[2007] La controverse de 1874 entre Camille Jordan et Leopold Kronecker, *Revue d'Histoire des Mathématiques*, 13(2) (2007), p. 187–257.

CAMPALANS (Rafael)

[1922] Lettre de Campalans à Weyl, Barcelone, le 29 mars 1922, 1922 ; lligall 3732-2, n° 195, dans [Archives 3]. Ref. : Roca Rosell.

CARTAN (Élie)

[1922] Sur un théorème fondamental de M. H. Weyl dans la théorie de l'espace métrique, *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, 175 (1922), p. 82–85.

COLEMAN (Robert) & KORTÉ (Herbert)

[2001] Hermann Weyl : Mathematician, Physicist, Philosopher, 2001 ; dans [Scholz 2001a], p. 215–250.

ECKES (Christophe)

[2011] *Groupes, invariants et géométries dans l'œuvre de Weyl*, thèse de doctorat, Université Jean Moulin Lyon 3, 2011.

[2014] *Les groupes de Lie dans l'œuvre de Hermann Weyl*, Nancy : Presses Universitaires de Lorraine, 2014.

FREI (Günther) & STAMMBACH (Urs)

[1992] *Hermann Weyl und die Mathematik an der ETH Zürich 1912–1930*, Boston : Birkhäuser, 1992.

FREUDENTHAL (Hans)

- [1956] Neuere Fassungen des Riemann-Helmholtz-Lieschen Raumproblems, *Mathematische Zeitschrift*, 63 (1956), p. 374–405.

HELMHOLTZ (Hermann von)

- [1868] Ueber die Thatsachen, welche der Geometrie zugrunde liegen, *Nachrichten von der Königl. Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen*, 9 (1868), p. 193–221.

LAUGWITZ (Detlef)

- [1958] Über eine Vermutung von Hermann Weyl zum Raumproblem, *Archiv der Mathematik*, 9 (1958), p. 128–133.

LIE (Sophus)

- [1890] Über die Grundlagen der Geometrie, *Berichte über die Verhandlungen der Kgl.-Sächsischen Gesellschaft der Wissenschaften zu Leipzig*, 42 (1890), p. 284–321, 355–418.

LOBO (Carlos)

- [2009] Mathématicien philosophe et philosophe mathématicien, Introduction et annotation de la correspondance Husserl-Weyl et Becker-Weyl, *Annales de phénoménologie*, 8 (2009), p. 205–226, 227–252.

LOINGER (Angelo)

- [1988] On Weyl's Raumproblem, *Rivista del nuovo cimento*, 11(8) (1988), p. 1–19.

MANCOSU (Paolo) & RYCKMAN (Thomas)

- [2002] Mathematics and Phenomenology : The Correspondence between O. Becker and H. Weyl, *Philosophia Mathematica*, 10 (2002), p. 130–202.
- [2005] Geometry, Physics and Phenomenology : Four Letters of O. Becker to H. Weyl, dans Peckhaus (Volker), éd., *Oskar Becker und die Philosophie der Mathematik*, München : Wilhelm Fink, 2005, p. 152–227.

MERKER (Joël)

- [2010] *Le problème de l'espace : Sophus Lie, Friedrich Engel et le problème de Riemann-Helmholtz*, Paris : Hermann, 2010.

MICHEL (Alain)

- [1992] *La constitution de la théorie moderne de l'intégration*, Paris : Vrin, 1992.

RIEMANN (Bernhard)

- [1919] *Über die Hypothesen, die der Geometrie zugrunde liegen*, Berlin : J. Springer, 1919 ; texte édité et commenté par Hermann Weyl, 1^{re} édition, d'après son texte d'habilitation de 1854.
- [1921] *Über die Hypothesen, die der Geometrie zugrunde liegen*, Berlin : J. Springer, 1921 ; texte édité et commenté par Hermann Weyl, 2^e édition.
- [1923] *Über die Hypothesen, die der Geometrie zugrunde liegen*, Berlin : J. Springer, 1923 ; texte édité et commenté par Hermann Weyl, 3^e édition.

ROCA ROSELL (Antoni)

- [1987] Hermann Weyl entre nosaltres. El curs de 1922 i algunes de les seves repercussions, Technical Report, Universitat Politècnica de Catalunya, 1987; <http://upcommons.upc.edu/e-prints/bitstream/2117/22995/1/HERMANN%20WEYL%20Roca.pdf>.

ROCA ROSELL (Antoni) & RON (José Manuel Sánchez)

- [1990] *Esteban Terradas. Ciencia y técnica en la España contemporánea*, Madrid : Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial, 1990.

ROCA ROSELL (Antoni)

- [2005a] Professionalism and Technocracy, Esteve Terradas and Science Policy in the Early Years of the Franco Regime, *Minerva*, 43 (2005), p. 147–162.
- [2005b] Einstein en Barcelona, *Quark : Ciencia, medicina, comunicación y cultura*, 36 (2005), p. 26–35.

ROCA ROSELL (Antoni) & GLICK (Thomas F.)

- [1982] Esteve Terradas (1883–1950) i Tullio Levi-Civita (1873–1941) : una correspondència, *DYNAMIS Acta Hispanica ad Medicinæ Scientiarumque Historiam Illustrandam*, 2 (1982), p. 387–402.

RON (José Manuel Sánchez), éd.

- [1988] *Ciencia y sociedad en España : de la Ilustración a la Guerra Civil*, Temas de nuestro tiempo, Madrid : El Arquero, 1988.

RYCKMAN (Thomas)

- [2004] *The Reign of relativity : Philosophy in physics 1915-1925*, Oxford : Oxford Univ. Press, 2004.

SCHEIBE (Erhard)

- [1957] Über das Weylsche Raumproblem, *Journal für die reine und angewandte Mathematik*, 197 (1957), p. 162–207.

SCHOLZ (Erhard)

- [1999] Weyl and the theory of connections, dans Gray (J.), éd., *The Symbolic Universe : Geometry and Physics 1890–1930*, Oxford : Oxford Univ. Press, 1999, p. 260–284.

SCHOLZ (Erhard), éd.

- [2001a] *Hermann Weyl's Raum-Zeit-Materie and a General Introduction to His Scientific Work*, Basel : Birkhäuser, 2001.

SCHOLZ (Erhard)

- [2001b] Weyls Infinitesimalgeometrie, 1917–1925, dans Scholz (Erhard), éd., *Hermann Weyl's Raum-Zeit-Materie and a General Introduction to His Scientific Work*, Basel : Birkhäuser, 2001, p. 85–104.
- [2004] Hermann Weyl's analysis of the “problem of space” and the origin of gauge structures, *Science in Context*, 17 (2004), p. 165–197.
- [2012] H. Weyl's and E. Cartan's proposals for infinitesimal geometry in the early 1920s, *Newsletter European Mathematical Society*, 84 (2012), p. 22–30.

- [2014] The problem of space in the light of relativity : the views of H. Weyl and E. Cartan, 2014 ; à paraître dans *Éléments d'une biographie de l'espace mathématique*, L. Bioesmat-Martagon (ed.), Nancy : Presses Universitaires de Lorraine.

SIEROKA (Norman)

- [2007] Weyl's "Agens Theory" of Matter and the Zurich Fichte, *Studies in History and Philosophy of Science*, 38(1) (2007), p. 84–107.
- [2008] Geometrisation versus Transcendent Matter : A Systematic Historiography of Theories of Matter, *British Journal for the Philosophy of Science*, 61 (2008), p. 798–802.
- [2009] Husserlian and Fichtean Leanings : Weyl on Logicism, Intuitionism, and Formalism, *Philosophia Scientiae*, 13(2) (2009), p. 85–96.

TERRADAS (Esterban)

- [1921] Lettre de Terradas à Weyl, Barcelone, le 30 Mars 1921. Hs. 91-761, 1921 ; dans [Archives1], ref. : A. Roca Rosell.
- [1922a] Lettre de Terradas à Weyl, Barcelone, le 17 janvier 1922, Hs. 91-762, 1922 ; dans [Archives1].
- [1922b] Lettre de Terradas à Levi-Civita, Barcelone, le 22 mars 1922, 1922 ; dans [Roca Rosell & Glick 1982].
- [1923] Lettre de Terradas à Bofill, Barcelone, le 27 janvier 1923, *Archives de l'Institut d'Etudes Catalanes*, 1923 ; ref. : A. Roca Rosell.

TORRETTI (Roberto)

- [1978] *Philosophy of Geometry from Riemann to Poincaré*, Episteme, vol. 7, Dordrecht, Boston : Dordrecht, 1978.

WEYL (Hermann)

- [1918a] *Das Kontinuum*, Leipzig : Veit and Co., 1918.
- [1918b] Reine Infinitesimalgeometrie, *Mathematische Zeitschrift*, 2 (1918), p. 381–411.
- [1918c] Gravitation und Elektrizität, *Sitzungsberichte des Königlich Preussischen Akademie des Wissenschaften zu Berlin*, 1918, p. 465–480.
- [1921a] *Raum, Zeit, Materie*, Berlin : J. Springer, 4^e édition, 1921.
- [1921b] Das Raumproblem, *Jahresbericht der Deutschen Mathematiker-Vereinigung*, 30 (1921), p. 92 (2^e partie du journal).
- [1921c] Zur Infinitesimalgeometrie : Einordnung der projektiven und konformen Auffassung, *Nachrichten von der Königl. Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen*, 1921, p. 99–112.
- [1921d] Lettre d'H. Weyl du 26-27 mars 1921 à E. Husserl, 1921 ; dans [Lobo 2009, p. 231–233].
- [1922a] Die Einzigartigkeit der Pythagoreischen Maßbestimmung, *Mathematische Zeitschrift*, 12 (1922), p. 114–146 ; remis en avril 1921.
- [1922b] Das Raumproblem, *Jahresbericht der Deutschen Mathematiker-Vereinigung*, 31 (1922), p. 205–221 ; remis le 1^{er} février 1922.
- [1922c] Zur Infinitesimalgeometrie : p -dimensionale Fläche um n -dimensionalen Raum, *Mathematische Zeitschrift*, 12 (1922), p. 154–160.
- [1922d] Conferencias del Profesor Hermann Weyl, *Revista Matemática Hispano-Americana*, 4(5) (1922), p. 72–75 ; ref. : Roca Rosell.

- [1922e] *Temps, Espace, Matière*, Paris : Albert Blanchard, 1922 ; traduction française de [Weyl 1921a] par G. Juvet et R. Leroy.
- [1922f] L'analyse mathématique du problème de l'espace, 1922 ; tapuscrit en français non publié, sans titre, non daté, non signé, 73 pages non numérotées, dans [Archives 2, carton FET26/2, chemise 2]. Nous citons le texte en le numérotant dans l'ordre naturel des pages, et en conservant le texte tel quel.
- [1922g] *Mathematische Analyse des Raumproblems*, 1922 ; tapuscrit en allemand, non daté, non signé, numéroté, dans [Archives 2, carton FET26/2, chemise 3].
- [1923a] *Mathematische Analyse des Raumproblems*, Berlin : J. Springer, 1923.
- [1923b] *Raum, Zeit, Materie*, Berlin : J. Springer, 5^e édition, 1923.
- [1923c] Zur Charakterisierung der Drehungsgruppe, *Mathematische Zeitschrift*, 17 (1923), p. 293–320 ; remis le 17 février 1922.
- [1939] *Classical Groups : their Invariants and Representations*, Princeton Univ. Press, 1939.
- [1991] *Analisi matematica del problema dello spazio*, Zanichelli Ed., 1991 ; notes et traduction par Angelo Loinger.
- [2015] *L'Analyse mathématique du problème de l'espace*, Presses Universitaires de Provence, 2015 ; édition franco-allemande commentée, traduction et commentaires par Eric Audureau et Julien Bernard (à paraître).

