La mécanique des fluides en France durant l'entre-deux-guerres : J. Kampé de Fériet et l'IMFL

Antonietta Demuro

▶ **To cite this version:**

Antonietta Demuro. La mécanique des fluides en France durant l'entre-deux-guerres : J. Kampé de Fériet et l'IMFL. Histoire, Philosophie et Sociologie des sciences. Université de Lille, 2018. Français. NNT : 2018LILUH032 . tel-02093155

HAL Id: tel-02093155
https://theses.hal.science/tel-02093155

Submitted on 8 Apr 2019

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

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

Université de Lille

École Doctorale Sciences de l'Homme et de la Société
Université de Lille

La mécanique des fluides en France durant l'entre-deux-guerres : J. Kampé de Fériet et l'IMFL

Thèse

présentée pour l'obtention du

Doctorat de l'Université de Lille

Discipline : **Épistémologie, histoire des sciences et des techniques**

par

Antonietta Demuro

Soutenue le 28 mai 2018 devant le jury composé de :

M. David Aubin	Rapporteur	Université Pierre-et-Marie-Curie Paris VI
M me Anouk Barberousse	Directeur	Université Paris-Sorbonne
M. Bruno Chanetz	Examinateur	Université Paris-Nanterre & ONERA
M. François Charru	Examinateur	Université de Toulouse & IMFT
M. Olivier Darrigol	Rapporteur	Université Paris-Diderot
M. Alexandre Guilbaud	Examinateur	Université Pierre-et-Marie-Curie - Paris VI
M me Anne-Lise Rey	Examinateur	Université de Lille
M me Rossana Tazzioli	Co-Directeur	Université de Lille

Thèse préparée aux

Laboratoire Savoir, Textes, Langage (UMR 8163-CNRS)
Université de Lille
Campus Pont de Bois,
59 650 Villeneuve d'Ascq CEDEX
et au

UFR de Mathématiques, Laboratoire Paul Painlevé (UMR CNRS 8524)
Université de Lille
Cité Scientifique,
59 655 Villeneuve d'Ascq CEDEX

El mar
sonríe a lo lejos.
Dientes de espuma,
labios de cielo.
(Federico García Lorca, 1919)

Contano quei due principi lì : non farsi mai troppe illusioni e non smettere di credere che ogni cosa che fai potrà servire
(Italo Calvino, 1963)

Résumé

La mécanique des fluides en France durant l'entre-deux-guerres : J. Kampé de Fériet et l'IMFL

Joseph Kampé de Fériet (1893–1982) est un mathématicien lillois, spécialiste international en mécanique des fluides et directeur de l'Institut de mécanique des fluides de Lille (IMFL) depuis sa création en 1929. En se familiarisant avec ce domaine et avec les questions expérimentales grâce à ses travaux de balistique pendant sa mobilisation scientifique à la Commission de Gâvre (1915-1919), ce savant a joué un triple rôle dans l'institut. En tant que mathématicien, il a donné une contribution remarquable à la théorie statistique de la turbulence de Taylor-von Karman à l'aide de la théorie des fonctions aléatoires de Kolmogorov, Khintchine, et Slutsky. En tant qu'expérimentateur, il a participé aux travaux expérimentaux de l'IMFL visant d'une part à étudier la turbulence atmosphérique et d'autre part à légitimer les idées de l'école française de Philippe Wehrlé et Georges Dedebant, une école qui s'est constituée au sein de la Commission de la Turbulence Atmosphérique, créée par le ministère de l'Air en 1935 et qui travaillait en étroite collaboration avec l'Office national de météorologie (ONM), l'Institut de mécanique des fluides de Paris et l'IMFL. Enfin, en tant que directeur, il a valorisé les liens avec l'industrie et la société lilloise comme il a valorisé ses liens avec les officiers militaires pendant son expérience à Gâvre.

Dans notre thèse, nous utiliserons le parcours scientifique et institutionnel de Joseph Kampé de Fériet - de sa mobilisation scientifique à la Commission de Gâvre (1915) à l'année de sa démission de la direction de l'IMFL (1945) - en tant que prisme pour répondre à des questions plus générales concernant la mécanique des fluides en France pendant la première moitié du xx^{ème} siècle, dont certaines, mais pas toutes, apportent des éléments nouveaux qui sont communs à la balistique et aux autres domaines des mathématiques appliquées.

Mots clés : Joseph Kampé de Fériet ; école de Wehrlé et Dedebant ; histoire de la mécanique des fluides au XXe siècle ; turbulence ; Institut de Mécanique des Fluides ; balistique ; fonctions aléatoires ; histoire des mathématiques appliquées au XXe siècle ; souffleries et anémomètres ; Ministère de l'Air ; Commission de Gâvre ; statistique

Abstract

The fluid mechanics in France during the interwar period :
J. Kampé de Fériet and the IMFL

Joseph Kampé de Fériet (1893-1982), a French mathematician of Lille, was an international specialist in fluid mechanics and was director of the Institut de mécanique des fluides de Lille (IMFL) from its creation in 1929. By familiarizing himself with this field and by addressing questions of an experimental nature through his work on ballistics, during his scientific wartime service to the Gâvre Commission from 1915 to 1919, this scientist played a triple role in the institute. As a mathematician, he made a remarkable contribution to Taylor-von Karman's statistical theory of turbulence using the theory of random functions due to Kolmogorov, Khintchine, and Slutsky. As an experimental scientist, he took part in the experimental work of the IMFL aiming on one hand to study atmospheric turbulence and, on the other hand, to validate the ideas of the French school of Philippe Wehrle and Georges Dedebant. This school was formed within the Atmospheric Turbulence Commission, created by the Minister of Air in 1935, which worked in close collaboration with the Office national de météorologie (ONM), the Institut de mécanique des fluides de Paris and the IMFL. Finally, as director of the institute, he strengthened links with industry and society in Lille, in the same way that he reinforced links with military officers during his work in Gâvre.

In our thesis, we will use the scientific and institutional career path of Joseph Kampé de Fériet – from his scientific wartime service at the Gâvre Commission (1915) up until the year of his resignation as director of the IMFL in 1945 - as a prism by which we will answer further questions of a more general nature regarding fluid mechanics in France during the first half of the twentieth century. Some but not all of these considerations bring to light new elements that are common to ballistics and to other areas of applied mathematics.

Keywords : Joseph Kampé de Fériet ; School of Wehrlé and Dedebant ; history of fluid mechanics in the 20th century ; turbulence ; Institute of Fluid Mechanics ; ballistics ; random functions ; history of applied mathematics in the twentieth century ; wind tunnels and anemometers ; Minister of Air ; Gâvre Commission ; statistics

Remerciements

Cette thèse est le résultat d'une recherche dynamique et interactive, basée sur l'échange continu non seulement entre chercheurs de formations variées mais aussi avec des archivistes et des personnes qui ont souhaité partager avec enthousiasme leurs souvenirs et leur intérêt à l'égard de Joseph Kampé de Fériet, de l'IMFL, et de l'histoire de l'université lilloise. La réalisation de ce travail n'a été rendue possible que grâce au financement généreux de la région qui s'appelait alors Nord-Pas-de-Calais et qui a consenti de soutenir, en collaboration avec l'université de Lille, un contrat doctoral de trois ans destiné à développer un sujet sur la science lilloise du XXe siècle.

Tout d'abord je tiens à remercier de tout mon cœur mes directrices de thèse, Anouk Barberousse et Rossana Tazzioli qui sont un fort exemple de professionnalisme et d'humanisme. J'apprécie grandement leur patience, leur disponibilité et leur soutien. C'est grâce à eux que j'ai pu découvrir, durant cette aventure doctorale, la manière de faire l'histoire des sciences avec méthodologie, rigueur et passion. Je ne pourrai jamais oublier vos précieuses remarques et vos encouragements à pousser toujours plus loin. Merci pour cette rencontre et pour tout ce qu'elle a généré.

Mes remerciements les plus vifs vont à David Aubin et à Olivier Darrigol qui m'ont fait l'honneur d'être rapporteurs de ma thèse et qui, durant mon parcours de recherche, ont pris le temps de m'écouter et de discuter avec moi. Leurs remarques m'ont permis d'envisager le travail avec un meilleur angle d'attaque. Je remercie également de façon très vive Bruno Chanetz, François Charru, Alexandre Guilbaud et Anne-Lise Rey qui ont accepté avec enthousiasme d'être examinateurs de ma thèse. Je les remercie pour leur lecture et pour l'intérêt qu'ils ont porté à l'égard de ce travail.

Un remerciement particulier doit également être adressé au centre ONERA de Lille, qui m'a donné la possibilité de consulter les archives de ce centre français de recherche aérospatiale. Plus précisément, j'aimerais exprimer toute ma recon-

naissance au directeur de l'Onera Lille, Benedict Clery, pour m'avoir accueilli chaleureusement dans cet institut ainsi qu'à Jean-Luc Charles et Laurence Lesne pour leurs précieux conseils, leur enthousiasme et leur encouragement. C'est grâce à eux que j'ai eu la chance et l'honneur de rencontrer et échanger avec M. Marc Kampé de Fériet et Jean Delporte. Je remercie également ces derniers pour leurs précieux souvenirs.

Toute ma reconnaissance va à Barnabé Croizat qui a pris la peine de relire et de corriger l'intégralité du texte au niveau du français, avec minutie et patience. Durant mon doctorat Barnabé n'a été pas seulement un collègue qui faisait une thèse sur Gaston Darboux mais il est aussi un professeur de français, un adversaire dans le match de football, de baby-foot et de karting... Mais surtout un cher ami sur qui compter : GRAZIE Barni ! Ici, il m'est impossible d'oublier de remercier infiniment Alexandre Maksoud et Michael Chalmers (et son père !) pour leur immense disponibilité et bonté dans la relecture des mes travaux rédigés en langue française et anglaise : je vous dois des lasagnes !

Je tiens ensuite à remercier Pierre Lamard pour la relecture de la thèse et pour m'avoir communiqué ses précieux commentaires et suggestions sur mon travail. Je tiens à remercier également Guillaume Jouve et Thomas Morel pour leurs remarques à propos des choix méthodologiques à effectuer dans la thèse et pour m'avoir toujours encouragé et soutenu durant mon doctorat.

À Giovanni Battimelli, Jean Dhombres, Marie Farge, Régis Juvanon du Vachat, Marie Thérèse Pourprix et les membres de l'ASA et de l'Association des Centraliens de Lille qui ont apporté une aide immense dans mes recherches, avec leurs conseils, leur compétence et leur disponibilité. Je remercie également René ESTIENNE, Sébastien Le Viavant, Jean-Claude Leroux et Danielle Quer pour m'avoir aidé dans la recherche de documents non classés dans les Archives du Service historique de la défense-armée de la Marine de Lorient, documents qui se sont relevés essentiels dans mon travail.

Pour leur accueil je veux aussi remercier les membres du laboratoire STL et du laboratoire Paul-Painlevé. En particulier merci à Valerio Vassallo pour les bons moments passés ensemble. Pour leur patience à gérer ma situation administrative très compliquée entre Lille 1 et Lille 3 ainsi qu'entre le doctorat et l'ATER, je tiens à remercier Justin Duquesnoy, Sabrina Abed, Sabine Hertsoen, Frédérique Maréchal et Christelle Outteryck. Merci également au personnel de la Bibliothèque, en particulier à Hélène Dehaudt et Catherine Gaquiere toujours prêtes à m'aider dans la recherche de documents utiles à mes recherches.

Je remercie chaleureusement ma famille qui m'a toujours très fortement soutenue et encouragée malgré la distance : papà, mamma, Marina et Aurora, VI RINGRAZIO DI CUORE !

Enfin, et non des moindres, je voudrais remercier mes amis et mes collègues du bureau tout simplement pour la joie avec laquelle ils colorent ma vie en France : Barnabé, Cecile, Fatma, Émilie, Jérémie, Antoine, Bilel, Gaston, Oguzhan, Alexandre, Gaia, Jimena, Min, Giulio, Clement, Angelo et Stefana. Et merci à tous ce qui la colorent en Italie : Giuseppe, Melissa, Pietro, Yari, Valeria, Serena, Anna, Roberta, Giacomo, Irene, Marta, Enrica, Alessio, Giulia, Francesca, Stefania, Alessandra, Sara, Valentina, Claudia, Marina, Sofia, Lucia et Caterina. Je remercie beaucoup Roberta, qui est une personne qui a une place importante dans mon coeur et qui m'a toujours aidé dans les questions de mathématiques appliquées et surtout de LaTeX : GRAZIE ROBI !

Table des matières

Remerciements vii

Table des matières xi

Table des figures xv

Introduction 1
La mécanique des fluides, un domaine des mathématiques appliquées . 2
La mécanique des fluides pendant la première moitié du XXe siècle : quel angle d'attaque ? 8
Kampé de Fériet et le concept du prisme 11
Plan de la thèse 17
Sources et archives consultées 19

1 La mécanique des fluides de la Grande Guerre à l'entre-deux-guerres 21
1.1 Mathématiciens et institutions militaires. La Commission de Gâvre 27
1.1.1 La Commission de Gâvre et son besoin du potentiel mathématique 29
1.1.2 1915-1920. Les mathématiciens à Gâvre 33
1.2 La mathématisation de la balistique. Jusqu'à quel point est-elle "utile" ? 40
1.3 Le problème principal de la balistique 41
1.3.1 Les méthodes numériques dans les tables de tir 44
1.3.2 Les méthodes analytiques dans le cas d'une fonction quelconque de la résistance de l'air 46
1.3.3 Une mathématisation "expérimentale" de la balistique. J. Kampé de Fériet 51
1.4 La mécanique des fluides pendant la guerre 61
1.5 Les mathématiciens et la balistique expérimentale. Le cas de Kampé de Fériet. 65
1.6 Conclusions 71

1.6.1 Le cas inverse. La balistique dans la mécanique des fluides à l'IMFL . . . 71
1.6.2 Les liens avec le milieu militaire en temps de paix . . . 72

2 L'institutionnalisation de la mécanique des fluides : le cas de l'IMFL 79
2.1 La mécanique des fluides avant la création des IMF (1900-1923). . 87
2.1.1 Une recherche théorique de la mécanique des fluides non négligeable bien qu'encore loin de l'expérimentation. . . . 87
2.1.2 L'hydraulique au sein des instituts électroniques françaises 90
2.1.3 L'émergence de l'Aéronautique. . . . 94
2.2 L'institutionnalisation de la mécanique des fluides à Lille. . . . 97
2.2.1 Lille et son attention vers les sciences appliquées . . . 98
2.2.2 Les origines de l'IMFL à l'Institut de Physique (1929-1933) 100
2.2.3 Le nouveau bâtiment du boulevard Paul Painlevé . . . 103
2.2.4 Pourquoi Kampé de Fériet a été nommé directeur de l'IMFL ? 105
2.3 Les dix premières années de l'IMFL sous la direction de Kampé de Fériet (1929-1939) . . . 108
2.3.1 Les installations . . . 109
2.3.2 Le caractère hétérogène du personnel de direction . . . 113
2.3.3 L'équipe de l'IMFL. Une histoire des moins connus . . . 117
2.3.4 Les journées scientifiques et techniques de mécanique des fluides de Lille . . . 120
2.3.5 L'enseignement. Un équilibre entre théorie, expérimentation et pratique . . . 124
2.3.6 La recherche et les essais industriels . . . 127
2.4 Conclusions . . . 132

3 Entre théorie et pratique. La théorie de la turbulence 137
3.1 La théorie de la turbulence. Une "faille béante" . . . 145
3.1.1 Les théories semi-empiriques . . . 146
3.1.2 La théorie statistique de la turbulence Taylor-Von Kármán . 148
3.2 La Commission de la Turbulence Atmosphérique (1935-1940) . . . 156
3.3 Wehrlé et Dedebant. Une "école" française de la turbulence . . . 158
3.3.1 Une approche "purement statistique" . . . 162
3.3.2 Une théorie légitimée par l'expérience . . . 165
3.3.3 Le rôle des équations de Navier-Stokes dans la théorie de Wehrlé et Dedebant . . . 173
3.3.4 L'IMFL et la légitimation expérimentale des idées de Wehrlé et Dedebant . . . 175
3.4 Renforcer la théorie à travers l'amélioration de l'outillage scientifique : l'IMFL . . . 182

3.4.1 Les techniques concernant les essais en soufflerie 183
3.4.2 Le perfectionnement des anémomètres à l'IMFL et l'anémo-clinomètre IMFL 188
3.5 Mathématiciens et travail en équipe : Kampé de Fériet en tant qu'expérimentateur 193
3.5.1 L'enregistrement cinématographique des mouvements des nuages 193
3.5.2 Une participation active aux campagnes aérologiques . . . 196
3.6 Conclusions 198

4 La mathématisation de la mécanique des fluides entre 1920 et 1940 205
4.1 Une mécanique des fluides autour d'Henri Villat et des solutions exactes. 215
4.1.1 Un développement "élégant" des recherches de Villat 218
4.1.2 L'étude des solutions exactes dans les fluides visqueux . . . 222
4.2 L'approche probabiliste à la mécanique des fluides autour de von Kármán 232
4.2.1 Une interprétation probabiliste du problème de la turbulence 236
4.2.2 Kampé de Fériet vs Wehrlé et Dedebant. La critique de Paul Lévy à l'égard de la dérivée aléatoire 239
4.3 Une généralisation de la théorie de Taylor-von Kármán 242
4.3.1 Le problème de la diffusion 242
4.3.2 La température aléatoire d'un fluide turbulent 244
4.3.3 La notion de spectre de la turbulence 244
4.3.4 L'analyse du concept de moyenne 247
4.4 Un spécialiste de mathématiques appliquées plus américain que français ? 250
4.4.1 Quelques considérations sur le concept de communauté en mécanique des fluides 251
4.4.2 Kampé de Fériet vs Villat ou jusqu'à quel point "on se rend bien compte de sa valeur" au sein du milieu autour de Villat 255
4.4.3 Une véritable intégration dans le milieu de von Kármán . . 258
4.4.4 Une profonde admiration chez les probabilistes français . . 263
4.5 Conclusions 265
4.5.1 "se borner à des curiosités mathématiques sous le nom de langage hydrodynamique" 265
4.5.2 *"Que ces probabilités sont utiles !"* 266

5 La mécanique des fluides entre 1940 et 1944 : le repli de l'IMFL à Toulouse 271
5.1 Le comité d'Aéronautique 277

5.2 L'IMFL à Toulouse 279
5.2.1 Le rôle de l'IMFL dans le comité d'Aéronautique 280
5.2.2 La mise au point de la "soufflerie Bois" 281
5.3 Le travail en clandestinité de l'IMFL à Toulouse. Le cas de Naftali Frenkiel 288
5.3.1 La période franco-belge de Naftali Frenkiel 289
5.3.2 Le travail en clandestinité de Frenkiel 291
5.4 Conclusions 298

Conclusions générales et perspectives **303**

A Les travaux expérimentaux de Kampé de Fériet **319**

B Le règlement intérieur de l'IMFL, date non précisée **343**

C Les collaborateurs de l'IMFL : quelques photos **349**

D Enseignements, séminaires et examens à l'IMFL **361**

E Liste des destinataires habituels des publications de l'IMFL **375**

F Extrait du texte *Hasard et Probabilité* (1945) **379**

G Les travaux en clandestinité de N. Frenkiel à Toulouse **383**

Sources d'Archives **395**

Bibliographie **397**

Table des figures

1.1 Kampé de Fériet et sa mobilisation à Gâvre : quelques questions . 27
1.2 Organisation de la Direction Centrale de l'Artillerie Navale 1913-1917 31
1.3 Les établissements sous le ministre de la Guerre 32
1.4 Les officiers militaires de Gâvre [Patard 1930] 33
1.5 Jules Prosper Charbonnier (1862-1936). 35
1.6 Problème principal de la balistique. 42
1.7 La trajectoire décrite par le problème balistique principal [D'Adhémar 1934, 7]. 43
1.8 Problème de la perturbation d'un arc de trajectoire. 56
1.9 Une onde balistique à grande vitesse [Darrieus 1922, 242]. 62
1.10 Principe du 2eappareil. 67
1.11 Le mouvement relatif de l'image du projectile sur une plaque en mouvement [Vagner 1937, 36]. 70
1.12 Image d'un projectile passant devant une flamme au magnesium [Kampé de Fériet 1925] 70
1.13 Appareil II (1919), Commission de Gâvre. 71
1.14 Appareil III (1924), Section Technique de l'Artillerie. 71
1.15 Allure curviligne du mouvement de la sphère accélérée [Vagner 1937, 36]. 76
1.16 Réseaux des savants en liaison avec Kampé de Fériet pendant sa mobilisation à Gâvre. 77

2.1 Réseau des pôles de mécanique des fluides sous le ministre de l'Air 85
2.2 Les institutions d'aéronautique avant la seconde guerre mondiale 86
2.3 La Faculté des Sciences de Lille, [Archives de l'ONERA Lille]. 98
2.4 Locaux de l'IMFL dans l'Institut de Physique. 103
2.5 Le nouveau bâtiment de l'IMFL. 105
2.6 Une maquette de la soufflerie horizontale. 110
2.7 Canal hydrodynamique [Archives de l'ONERA Lille]. 111
2.8 Soufflerie verticale [Archives de l'ONERA Lille]. 112

2.9 Les adhérents aux "Journées Scientifiques et Techniques de Mécanique des Fluides". 124
2.10 Visite de la soufflerie horizontale IMFL dans les années 1937-1938, [Archives de l'ONERA Lille] 130
2.11 Nombre d'heures de fonctionnement de la grande soufflerie de 1934 au 1939. 132

3.1 Les valeurs de $R(x)$ calculées à partir de $F(\omega)$ [Taylor 1938] 155
3.2 Méthode de cinématographie de bulles de savon. 177
3.3 Résultats expérimentaux prouvant la validité de la théorie de Wehrlé et Dedebant [Kampé de Fériet 1939b] 180
3.4 Courbes de fréquences de la vitesse, du dérapage et de l'incidence obtenues par l'IMFL. 181
3.5 Effet sur la polaire d'une maquette d'avion de la modification de la turbulence de la soufflerie [Guienne 1940] 185
3.6 Réseau de courbes relatives à une sphère et un cylindre [Guienne 1940] 187
3.7 Schéma de fonctionnement de l'anémoclinomètre IMFL [Martinot-Lagarde et. al. 1952]. 189
3.8 L'anémoclinomètre IMFL 190
3.9 Nuage de sillage du Mont Cervin (4505 m), prise de vue de J. Kampé de Fériet [Archives de l'ONERA Lille]. 195
3.10 Campagne aérologique du Col de Voza, 9-30 juillet 1939. 197

4.1 Deux plans différents représentant la même configuration du fluide autour d'un obstacle.[Villat 1914] 219

5.2 La soufflerie bois 283
5.3 Comparaison des divers nombres critiques de Reynolds en fonction du coefficient de traînée [Moraux 1943] 286
5.4 Uniformisation la pression le long de la veine guidée [Fauquet 1946] 287
5.5 Coefficient de corrélation longitudinal et transversaux mesurées par Simmons et Salter à la National Physical Laboratory (NPL) . . 296
5.6 Spectre de la turbulence mesuré par Simmons et Salter 297
5.7 Visite d'adieux de Kampé de Fériet, 3 juillet 1946 301

A.1 Les travaux expérimentaux de Kampé de Fériet, p. 1 330
A.2 Les travaux expérimentaux de Kampé de Fériet, p. 2 331
A.3 Les travaux expérimentaux de Kampé de Fériet, p. 3 332
A.4 Les travaux expérimentaux de Kampé de Fériet, p. 4 333
A.5 Les travaux expérimentaux de Kampé de Fériet, p. 5 334
A.6 Les travaux expérimentaux de Kampé de Fériet, p. 6 335

A.7 Les travaux expérimentaux de Kampé de Fériet, p. 7 336
A.8 Les travaux expérimentaux de Kampé de Fériet, p. 8 337
A.9 Les travaux expérimentaux de Kampé de Fériet, p. 9 338
A.10 Les travaux expérimentaux de Kampé de Fériet, p. 10 339
A.11 Les travaux expérimentaux de Kampé de Fériet, p. 11 340
A.12 Les travaux expérimentaux de Kampé de Fériet, p. 12 341

B.1 Le règlement intérieur de l'IMFL, p. 1 344
B.2 Le règlement intérieur de l'IMFL, p. 2 345
B.3 Le règlement intérieur de l'IMFL, p. 3 346
B.4 Le règlement intérieur de l'IMFL, p. 4 347

C.1 Caricature de Kampé de Fériet, collection Gryson 350
C.2 Caricature de Martinot-Lagarde, collection Gryson 351
C.3 Caricature de Fauquet, collection Gryson 352
C.4 Caricature de Guienne, collection Gryson 353
C.5 Caricature de Guillemet, collection Gryson 354
C.6 Caricature de Rollin, collection Gryson 355
C.7 Caricature de Vagner, collection Gryson 356
C.8 Kampé de Fériet et Henri Mignet (créateur du Pou du Ciel) 357
C.9 Kampé de Fériet et Martinot-Lagarde 358
C.10 Les collaborateurs de l'IMFL pendant une préparation d'une campagne d'aérologie 358
C.11 Le voyage Lille-Toulouse à vélo, collection Gryson (1940) 359
C.12 Martinot-Lagarde, Kampé de Fériet et Gérard Gontier 360

D.1 Programme du cours de mécanique des fluides théorique 362
D.2 Programme du cours de mécanique des fluides expérimentale . . . 363
D.3 Programme du cours d'aérodynamique appliquée à l'aviation . . . 364
D.4 Programme de l'examen de mécanique des fluides de l'IDN, 1936 365
D.5 Programme de l'examen de mécanique des fluides de l'IDN, 1936 366
D.6 Séminaire du 23 octobre 1936, Kampé de Fériet et Martinot-Lagarde 367
D.7 Séminaire du 23 octobre 1936, Kampé de Fériet et Martinot-Lagarde 368
D.8 Séminaire du 2 décembre 1936, Kampé de Fériet 369
D.9 Séminaire du 2 décembre 1936, Kampé de Fériet 370
D.10 Séminaire du 15 décembre 1936, Sauvegrain 371
D.11 Séminaire du 24 mai 1938, Martinot-Lagarde 372
D.12 Séminaire du 24 mai 1938, Martinot-Lagarde 373
D.13 Séminaire du 24 mai 1938, Martinot-Lagarde 374

E.1 Liste des destinataires habituels des publications de l'IMFL, p. 1 . 376
E.2 Liste des destinataires habituels des publications de l'IMFL, p. 2 . 377

E.3 Liste des destinataires habituels des publications de l'IMFL, p. 3 . 378

G.1 Les travaux en clandestinité de N. Frenkiel, p. 1 384
G.2 Les travaux en clandestinité de N. Frenkiel, p. 2 385
G.3 Les travaux en clandestinité de N. Frenkiel, p. 3 386
G.4 Les travaux en clandestinité de N. Frenkiel, p. 4 387
G.5 Pag. 5 388
G.6 Les travaux en clandestinité de N. Frenkiel, p. 6 389
G.7 Les travaux en clandestinité de N. Frenkiel, p. 7 390
G.8 Les travaux en clandestinité de N. Frenkiel, p. 8 391
G.9 Les travaux en clandestinité de N. Frenkiel, p. 9 392
G.10 Les travaux en clandestinité de N. Frenkiel, p. 10 393
G.11 Les travaux en clandestinité de N. Frenkiel, p. 11 394

Introduction

> Applied mathematics is not a definable scientific field but a human attitude. The attitude of the applied scientist is directed towards finding clear cut answers which can stand the test of empirical observation. To obtain the answers to theoretically often insuperably difficult problems, he must be willing to make compromises regarding rigorous mathematical completeness ; he must supplement theoretical reasoning by numerical work, plausibility considerations and so on.
>
> Richard Courant (1965)

Dans cette thèse nous apportons une contribution originale à plusieurs aspects de l'histoire de la mécanique des fluides des cinquante premières années du XX^{e} siècle. Son fil conducteur est la trajectoire scientifique du mathématicien Joseph Kampé de Fériet, mobilisé à la Commission de Gâvre de 1915 à 1919 et directeur de l'Institut de Mécanique des Fluides de Lille (IMFL), de sa création en 1929 jusqu'à 1945. Notre étude vise à mettre en lumière quelques aspects de cette discipline à la fois sur le plan scientifique et sur celui des institutions. Elle ne se focalise pas sur le contenu mathématique du travail de Kampé de Fériet mais présente aussi les parties de son travail qui relèvent de la physique et de l'ingénierie. Ce travail s'inscrit dans l'histoire des mathématiques appliquées de la première moitié du xx^{e} siècle, ce qui rend primordiale la confrontation avec un contexte disciplinaire plus large.

La mécanique des fluides, un domaine des mathématiques appliquées

Souvent, la mécanique des fluides a été associée aux mathématiques appliquées, et l'est encore. En effet, nous avons à faire à un domaine au croisement entre mathématiques, physique et ingénierie. C'est l'étude d'une maquette d'avion dans une soufflerie, la consolidation des principes mathématiques de la théorie de la résistance d'un fluide parfait à l'aide des théorèmes de l'analyse, la résolution du problème physique de la dissipation de l'énergie d'un tourbillon dans un écoulement turbulent. La complexité de cette discipline ne peut être saisie qu'à travers la compréhension de sa place au sein des mathématiques appliquées et de ses problématiques historiographiques. Dans cette réflexion, avant d'aborder la mécanique des fluides *per se* , deux questions clés méritent une attention particulière.

Comment décrire ce domaine à partir de l'historiographie des mathématiques appliquées ? Quel est la place de la physique mathématique dans l'évolution de la mathématisation de ce domaine ? Tout d'abord, dans l'étude de ces questions, il faut prendre en considération une caractéristique fondamentale de l'historiographie disponible : il n'existe pas de notion fixe de mathématiques appliquées [1]. Il s'agit d'une notion très large et très complexe, surtout si nous pensons à son rôle d'interface entre les mathématiques et une grande variété d'autres domaines scientifiques et technologiques. A ce propos, William Prager (1903-1980), qui a mis en place un important centre de mathématiques appliquées à la Brown University pendant la première moitié du xx^{e} siècle, expliquait que :

> "Precisely to define applied mathematics is next to impossible. It cannot be done in terms of subject matter : the borderline between theory and application is highly subjective and shifts with time. Nor can it be done in terms of motivation : to study a mathematical problem for its own sake is surely not the exclusive privilege of pure mathematicians. Perhaps the best I can do within the framework of this talk is to describe applied mathematics as the bridge connecting pure mathematics with science and technology. " [2]

D'un côté, cette notion est associée à un certain champ institutionnel et scientifique. En effet, suite à la réforme de Klein en Allemagne autour des années 1900

1. Pour une histoire des mathématiques appliquées dans le paysage international, voir le chapitre rédigé par June Barrow-Green and Reinhard Siegmund-Schultze dans [Higham 2015, 55-79]. De façon plus générale, sur l'histoire des sciences du xx^{e} siècle voir [Pestre et Bonneuil 2015].

2. Citation reproduite dans [Higham 2015, 1].

[Rowe 1989], qui se diffusera d'abord en Europe et ensuite aux États-Unis, les mathématiques appliquées évoluent de plus en plus en une discipline autonome des mathématiques en se distinguant des mathématiques pures. Cela se manifeste dans la naissance de nouvelles chaires, d'instituts, d'associations et de revues de mathématiques appliquées.

A Göttingen, des chaires de mathématiques appliquées étaient créées en 1904 avec Carl Runge et Ludwig Prandtl ; à Berlin, Richard Von Mises dévient le premier directeur de l'Institut de Mathématiques Appliquées en 1920 ainsi que l'éditeur du journal *Zeitschrift fur Angewandte Mathematik und Mechanik* (ZAMM), crée en 1921. La création de l'Institut de Physique et Mathématiques de l'Académie Soviétique des Sciences par Vladimir Steklov en 1921 et de l'Istituto per le applicazioni del calcolo (d'abord à Naples et puis à Rome) en 1927 par Mauro Picone a été cruciale pour le développement des mathématiques appliquées respectivement en Russie et en Italie. En ce qui concerne la France, nous pouvons mentionner l'Institut Henri Poincaré créé en 1926 sous l'initiative d'Emile Borel. Conçu en soulignant l'importance des liens entre les mathématiques pures et les applications, cet institut avait pour but de promouvoir la physique mathématique et le calcul des probabilités. Enfin, aux États-Unis, l'essor de plusieurs centres de mathématiques appliquées se manifeste à partir des années 1930 avec l'arrivée de plusieurs scientifiques allemands qui échappaient au régime de Hitler et qui importent la tradition allemande dans ce centre. C'est le cas, par exemple, de Richard Courant, William Prager et Theodore von Kármán.

Dans ce contexte, le XX^{e} siècle peut être considéré comme un siècle de reconstruction des mathématiques appliquées [Higham 2015, 66], marqué par de profondes transformations scientifiques et institutionnelles à travers lesquelles les mathématiques appliquées et les mathématiciens acquièrent une physionomie nouvelle comparée à la première vague de renouvellement qui a eu lieu au moment de la révolution industrielle du XIX^{e} siècle [3].

De l'autre côté, elles sont liées à une "attitude humaine" : on trouve des mathématiciens, des physiciens et des ingénieurs qui, bien que n'étant pas rattachés à une institution ou à une chaire de mathématiques appliquées, peuvent être considérés comme des spécialistes de mathématiques appliquées à partir du moment où ils ont recours aux savoirs mathématiques dans le but de mathématiser

3. Cette première vague de renouvellement des mathématiques appliquées avait favorisé la systématisation de l'éducation des ingénieurs, d'abord en France, et ensuite dans les autres pays. Au sein de cette éducation, les mathématiques commencent à être reconnues comme une discipline essentielle pour résoudre les problèmes scientifiques et technologies posés par l'industrie et la société en pleine explosion. A ce propos voir par exemple [Konstantinos 2009] et [Tournès 2012].

un domaine de la physique ou de l'ingénierie. Nous pouvons donc découvrir un grand nombre de trajectoires individuelles et professionnelles différentes en fonction de l'approche adoptée, qui peut être plus au moins rigoureuse, et du rôle joué au sein des mathématiques appliquées. Parfois, ces chercheurs s'attachent à consolider les principes mathématiques de la physique afin de donner à cette dernière un fondement plus solide et plus rigoureux, de sorte que les mathématiques appliquées se distinguent rarement de la physique mathématique. Parfois, ils utilisent des outils mathématiques pour résoudre des problèmes de physique en donnant la priorité à l'application plutôt que à la consolidation de l'édifice mathématique au somment duquel ce problème se pose. D'après les historiens des sciences John Greenberg et Judith Goodstein, ces deux profils sont représentés respectivement par le physicien mathématique Richard Courant et le spécialiste de mathématiques appliquées et d'aéronautique Theodore von Kármán. En évoquant la métaphore de von Kármán qui considérait les mathématiques appliquées comme "a warehouse of mathematical knowledge", ils écrivent :

> "The scientists could live in the modern and find uses for the equations on the shelf, or he could visit the place from time to time with a shopping list. Von Kármán saw himself as a shopper, not as a the caretaker of the mathematical building. [...] The fact that von Kármán and Courant, who emigrated to the United States in 1934, did not see eye-to-eye on the development of applied mathematics, also suggests that there were some basic differences. Simply put, the two scientists did not speak the same language. Courant was fundamentally interested in mathematical physics [...] Unlike von Kármán who used mathematics to solve physics problems, Courant stressed general theories." [Greenberg et Googstein 1983, 12]

Courant et von Kármán s'auto-proclamaient tous deux spécialistes de mathématiques appliquées. Cependant, von Kármán ne considérait pas Courant comme un mathématicien de cette sorte ; mais comme un spécialiste de physique mathématique ; en même temps, ses autres collègues le critiquaient pour son approche peu abstraite. D'après Amy Dahan Dalmedico, "un même homme peut être perçu comme un mathématicien appliqué par un groupe et comme un mathématicien pur par d'autres praticiens : des mathématiciens purs aux plus appliqués le spectre est continu" [Dahan Dalmedico 1996, 161]. Nous pouvons remarquer aussi que la communauté internationale qui s'est constituée autour des Congrès Internationaux de Mécanique Appliquée a eu comme fondateurs Tullio Levi-Civita et von Kármán, deux spécialistes de mathématiques appliquées qui ne parlaient pas la même langue, étant donné que le premier est un spécialiste de physique mathématique qui a également produit des contributions remarquables aux mathématiques dites "pures" (comme la géométrie différentielle et la théorie des nombres). Pour

le dire autrement, la notion de mathématiques appliquées est si vaste qu'on ne peut pas les envisager seulement comme un domaine scientifique et institutionnel mais qu'on doit aussi les concevoir comme une "attitude humaine" des divers scientifiques que l'on peut identifier comme des "shoppers" ou des "caretakers" de l'édifice mathématique d'un domaine de l'ingénierie ou de la physique.

Un autre élément auquel il convient d'être attentif dans l'analyse du contexte présenté ci-dessus est le risque de tomber sur une historiographie des mathématiques appliquées qui soit coupée de celle des mathématiques pures. Mettre les mathématiques pures dans une position marginale ne donnera qu'une vision partielle du panorama des mathématiques appliquées. Cet aspect a été remarqué lors de la conférence Oberwolfach sous le titre "From "Mixed" to "Applied" Mathematics : Tracing an important dimension of mathematics and its history" organisée par Moritz Epple, Tinne Hoff Kjelsen et Reinhard Siegmund-Schultze (3-9 mars 2013). Dans l'introduction du rapport de la conférence, les organisateurs en présentent le contenu de la façon suivante :

> " [...] we have to deal with a field of interactions of the production of mathematical knowledge with a large and variable number of scientific, technological and social areas beyond the core disciplines of "pure" mathematics. For want of a better term, and without taking the term literally, we call this field the "applied field" of mathematics. [...] the emphasis was not to establish a separate historiography of applied mathematics per se, but rather to understand how the whole of mathematics was internally structured both with a view to 'applications' and to its relation with extra-mathematical domains". [Mathematisches Forschungsinstitut Oberwolfach, Report No. 12/2013, pp. 658-659]

En ce qui concerne le cas spécifique de la France, nous pouvons mentionner le travail remarquable de l'historienne des mathématiques Juliette Leloup. Elle a étudié l'entre-deux-guerres mathématique à travers l'analyse d'un corpus des 242 doctorats d'État en sciences mathématiques soutenus en France entre 1914 et 1945. Dans l'introduction de sa thèse, elle écrit :

> "L'historiographie actuelle sur l'entre-deux-guerres souffre donc de deux manques. Tout d'abord, comme je l'ai indiqué plus haut, les images disponibles en sont fragmentées. Les mathématiques pures et les mathématiques appliquées sont décrites par des historiographies distinctes, la première laissant dans l'ombre la seconde. Une nouvelle étude de l'entre-deux-guerres nécessite donc une approche globale, sans morcellements, qui n'impose pas de filtres a priori sur les domaines qui composent les sciences mathématiques. Cette approche globale est rendue d'autant plus nécessaire que des études récentes ont

> montré que l'image produite par l'historiographie du groupe Bourbaki sur le milieu mathématique était incomplète. Des pans importants, au moins quantitativement, des sciences mathématiques, la géométrie, les probabilités, la mécanique des fluides, etc., ont été mis de côté. En outre les méthodes même de construction de l'historiographie des Bourbaki posent question par leur dépendance aux souvenirs de certains acteurs de l'entre-deux-guerres. Une nouvelle approche des mathématiques françaises de l'entre-deux-guerres nécessite alors de ne plus utiliser exclusivement ni des témoignages directs ou rapportés ni des souvenirs écrits." [Leloup 2009, 26]

Le paysage mathématique moderne français est donc plus complexe et varié de que ce qu'on pense généralement. Dans un autre travail publié en collaboration avec Hélène Gispert [Gispert et Leloup 2009], Juliette Leloup identifie certaines caractéristiques de l'activité mathématique de cette période et les *Patrons* des mathématiques, en précisant les effets de la Première Guerre mondiale [4] et en soulignant cette complexité. D'après elles, le monde de la jeune génération de l'entre-deux-guerres n'est pas monolithique : si d'un côté il y a les futurs Bourbaki [5], de l'autre côté, il y a par exemple, les collaborateurs et les étudiants d'Henri Villat en mécanique des fluides et ceux de Borel et Fréchet en calcul des probabilités. Il faut prendre en compte cette diversité de la nouvelle génération des mathématiciens "dans la réflexion historiographique sur la modernité mathématique et ses acteurs dans les premières décennies du xx^{e} siècle." [Gispert et Leloup 2009, 101]. A partir d'un autre angle d'attaque, celui de l'étude d'une institution, Siegmund-Schultze met en évidence l'approche concrète et institutionnelle de l'IHP qui s'oppose à celle plus abstraite, jeune et intellectuelle, représentée par le groupe Bourbaki [Siegmund-Schultze 2009a]. A cette époque, au moins en France, la mécanique des fluides était considérée comme une branche des mathématiques appliquées de même que l'astronomie, la géodésie et la géophysique, la mécanique des solides, la théorie de la relativité, la théorie des quantas et la cinématique [6].

4. Il s'agit des mathématiciens, qui pendant l'entre deux-guerre, détenaient un fort pouvoir intellectuel et institutionnel à l'Académie des Sciences, dans l'édition et les jurys de thèse.

5. Pour une bibliographie du bourbakisme et une analyse de ce mouvement voir [Beaulieu 1989].

6. Ce classement des divers domaines spécifiques des mathématiques appliquées françaises de l'entre-deux-guerres [Leloup 2009] est donné par Juliette Leloup. Nous nous appuierons sur cette étude pour rendre légitime le point de vue historiographique selon lequel la mécanique des fluides française fait partie des mathématiques appliquées dans la période envisagée. Comme nous le verrons dans cette thèse, si nous considérons la période de la première guerre mondiale, nous pouvons ajouter aussi la balistique, à laquelle plusieurs mathématiciens ont contribué pendant et après la guerre, et dont les travaux sont parus principalement dans le *Mémorial de l'artillerie française*.

En ces circonstances, il est évident que certains aspects scientifiques et institutionnels des mathématiques appliquées - développés en prenant en compte les éléments historiographiques décrits précédemment - se reflètent dans l'état de la mécanique des fluides en tant qu'un de ses sous-domaines. Ces aspects se manifestent selon plusieurs axes. En premier lieu, selon l'axe de l'institutionnalisation de la mécanique des fluide. En second lieu, selon l'axe des collaborations entre les acteurs de ce domaine - jeunes mathématiciens, physiciens et ingénieurs - au sein des institutions de mécanique des fluides et plus généralement au sein de la société. Dans ce contexte, un facteur décisif a été le rôle militaire qu'ont joué les mathématiciens pendant la guerre, qui a laissé dans le paysage mathématique moderne des traces non négligeables, y compris dans la mécanique des fluides : la reconnaissance de l'importance des mathématiques dans les inventions techniques liées aux applications militaires et industrielles, une insertion majeure des mathématiciens dans les laboratoires expérimentaux ainsi que dans les structures non universitaires (industrie et institutions militaires) et dans la société en général. En troisième lieu, selon l'approche à la mécanique des fluides comme domaine d'interface entre les mathématiques et les aspects expérimentaux et pratiques de la science. A partir du xx^{e} siècle, l'applicabilité des théories est considérée comme étant toujours plus importante par les ingénieurs aussi bien que par les physiciens et les mathématiciens, qui changent leurs approches et mobilisent des expérimentateurs pour mettre à l'épreuve des théories toujours plus applicables. En même temps, le perfectionnement des instruments de calcul, de mesure et de construction dans les laboratoires joue un rôle considérable dans le développement de nouvelles théories et des applications. C'est le début d'une nouvelle façon de concevoir les problèmes posés par la mécanique des fluides, qui sont maintenant étudiés à l'aide de modèles mathématiques, des statistiques, du calcul des probabilités et, plus tard, de l'ordinateur.

Ainsi, l'histoire de la mécanique des fluides est une histoire qui sort de l'orbite de l'histoire des mathématiques et qui se mêle avec celle plus générale des sciences, en englobant divers espaces de savoir autres que l'université (Etat, industrie et sphère militaire), les laboratoires "qui refont le monde à travers le détour par ce lieu artificiel qu'est l'expérimentation contrôlée " [Pestre et Bonneuil 2015, 18],[7], le déploiement de nouveaux outils mathématiques dans les pratiques scientifiques, et la guerre comme un événement tragique mais qui apportes des nouveautés scientifiques. Dans cette prise de conscience que la mécanique des fluides est un domaine particulier des mathématiques appliquées, il faudra identifier et

7. De façon générale, les laboratoires ont commencé à avoir progressivement une part plus importante par rapport à l'observation et la collection dans les pratiques scientifiques à partir du XIX^{e} siècle. Pour le cas de l'astronomie, voir par exemple [Aubin 2009].

questionner les diverses problématiques-clés issues de chacun de ces axes. Cela nous permettra de comprendre l'état de ce domaine pendant la première moitié du xx^{e} siècle. Quel angle d'attaque permet d'identifier ces problématiques ?

La mécanique des fluides pendant la première moitié du XXe siècle : quel angle d'attaque permet de détecter les problématiques-clés ?

La littérature secondaire concernant la mécanique des fluides est assez pauvre, surtout en ce qui concerne le xx^{e} siècle. Dans son livre sur l'histoire de la mécanique des fluides *Worlds of flow*, Olivier Darrigol écrit :

> "the historian interest in hydrodynamics indeed seems to have inversely proportional to its historical importance. The two main reasons for this neglect have been the technical difficulty of the subject, and the focus of historians of the nineteenth and twentieth centuries on entirely new theories such as electrodynamics, thermodynamics, relativity, and quantum theory " [Darrigol 2005, IX]

Cependant, depuis les dernières années, plusieurs recherches significatives ont contribué à changer cette situation. En particulier, David Aubin a étudié la trajectoire scientifique et institutionnelle d'Henri Villat, directeur de l'Institut de Mécanique des Fluides de Paris [Aubin 2006] ; Rossana Tazzioli a mis en évidence les influences de l'école italienne de Levi-Civita sur l'hydrodynamique française des trente premières années du XX^{e} siècle [Tazzioli 2016] et les discussions d'Henri Villat, Pierre Duhem et Marcel Brouillon autour du paradoxe de d'Alembert [Tazzioli 2017–07] ; Mounier-Kuhn s'est focalisé sur le phénomène d'étatisation de la mécanique des fluides autour du ministre de l'Air [Mounier-Kuhn 1996], alors que François Charru et Claudine Fontanon ont analysé, respectivement, les milieux toulousain et parisien de la mécanique des fluides [Charru 2017–08], [Charru 2017–08] [Fontanon 2006], [Fontanon 2017]. Sur un autre plan, en ce qui concerne l'état de l'expérimentation dans le domaine de l'aérodynamique, nous pouvons mentionner l'ouvrage collectif rédigé sous l'égide de la Commission technique Aérodynamique de l'Association Aéronautique et Astronautique de France (3AF) [Chanetz et. al. 2017]. Il faut cependant reconnaître qu'une telle étude n'aurait été pas possible sans connaissance préalable de l'état de l'hydrodynamique et de l'hydraulique pendant les siècles précédents. Dans ce contexte, outre le livre de Darrigol déjà mentionné, les travaux d'Alexandre Guilbaud ont été précieux pour comprendre les continuités et les ruptures de ce domaine au XVIII ^{e} siècle [Guilbaud 2012].

Par le renouveau qu'ils ont apportés à l'histoire de la mécanique des fluides, les travaux mentionnés ci-dessus, qui épuisent presque toute la littérature sur ce sujet, suggèrent la pertinence d'un nouveau pas en avant, qui va au-delà d'une étude de cas et questionne les aspects multiples et généraux du domaine pendant l'entre-deux-guerres, compris dans le cadre plus général des mathématiques appliquées de cette période. Un tel travail a été réalisé, par exemple, par Michael Eckert en qui concerne le cas de la mécanique des fluides allemande. Dans son livre, *The Dawn of Fluid Dynamics*, l'historien de la physique s'appuie sur l'étude de l'école de Prandtl à Göttingen pour donner une vision d'ensemble plus générale de ce domaine, à la fois sur le plan scientifique et institutionnel. Dans l'introduction de son livre, il est explicite sur le fait que son but n'est pas une biographie de Prandtl mais l'étude de l'émergence d'un domaine dont le physicien allemand constitue une figure-clé pour l'expliquer :

> "In order to avoid any misunderstanding : this is not a biography of Prandtl, however desirable an account of Prandtl's life might be. Nor is it a hero story ; I do not claim that the emergence of modern fluid dynamics is due solely to Prandtl. If Prandtl and his Göttingen circle's work is pursued here in more detail than that of other key figures of this discipline, it is because the narrative needs a thread to link its parts, and Prandtl's contributions provide enough coherence for this purpose. The history of fluid dynamics in the age of Prandtl, as presented in the following account, is particularly a narrative about how science and technology interacted with another in the twentieth century." [Eckert 2007, X]

Le travail d'Eckert et ses choix méthodologiques nous ont beaucoup inspiré. Ils nous ont suggéré la voie à suivre pour aborder les multiples aspects de la mécanique des fluides française, qui consiste à saisir l'engagement scientifique et institutionnel de Kampé de Fériet comme élément-clé de ce domaine.

Le deuxième travail sur lequel nous nous sommes appuyés est celui de Reinhard Siegmund-Schultze sur le rôle des mathématiques et des mathématiciens pendant la seconde guerre mondiale [Siegmund-Schultze 2003b]. Nous considérons le travail de cet historien des mathématiques comme nous autorisant à entreprendre l'écriture d'une histoire de la mécanique des fluides entre 1915 et 1945, c'est-à-dire non restreinte à la période de paix (1919-1939) mais incluant la période des deux guerres mondiales. Dans son article, Siegmund-Schultze a fait quelques propositions méthodologiques pour enquêter sur la place des différents domaines mathématiques académiques, dont les mathématique pures, et des mathématiciens dans les travaux militaires (aéronautique, balistique, fusées etc.), en examinant les cas de l'Allemagne et des États-Unis, et en faisant quelques

remarques sur d'autres pays (France, Union Soviétique, Japon et Italie). Dans cet article, il explique les raisons pour lesquelles il envisage toute la période 1915-1945 :

> "I decided to gradually extend the topic originally suggested to me, namely "Military Work of mathematicians in World War II", in at least three different directions :
> — in the direction of mathematics, not just mathematicians
> — in the direction of considering the whole period which includes the World Wars ; because, as it will be seen, the second one is politically, historically, mentally, even scientifically so closely linked to the first, and because the relation between mathematics and the military can only be understood in a broader historical frame ;
> — in the direction of stressing (if not really discussing) the emerging relations of mathematics to industry exactly in this period between the wars. In particular it would be rather artificial, nearly ridiculous, to separate industrial work of mathematicians during the wars from military work. As one historian put it in con- nection with his discussion of the militarily and economically highly relevant telephone technologies, which need a lot of mathematics : In modern societies it makes little sense to distinguish sharply between military and non-military technologies" [Siegmund-Schultze 2003b, 26]

Dans notre étude, nous avons transposé ces propositions méthodologiques sur le rôle des mathématiciens et des mathématiques dans les institutions militaires à leur rôle dans la mécanique des fluides, en déplaçant le centre d'intérêt de la seconde guerre mondiale à l'entre-deux-guerres. Pour le dire autrement, ces remarques méthodologiques nous ont donné la liberté de ne pas envisager la période de l'entre-deux-guerres au sens strict du terme mais de considérer les deux guerres mondiales comme deux événements essentiels pour comprendre la période entre-deux-guerres. De plus, elles nous ont fourni des lignes directrices pour mettre au jour quelques aspects généraux relatifs au domaine de la mécanique des fluides française qui sont communs à la plupart des domaines des mathématiques appliquées et qui répondent à la question :

> How did the communication channels function between academic mathematics and the application areas, [..] and to which extent did this depend on the very different social and national preconditions ? [Siegmund-Schultze 2003b, 26]

Cette thèse ne se limitera pas à ce type de problématiques, mais les croisera au contraire avec d'autres questions internes à la mécanique des fluides, et qui la distinguent des autres domaines de mathématiques appliquées : la place des

l'aéronautique et l'hydraulique dans le cadre de son institutionnalisation et de son étatisation, les types de sujets envisagés et les approches théoriques plus au moins applicables et leur degré d'implication dans les laboratoires d'aérodynamique et d'hydraulique, l'outillage scientifique adopté (soufflerie et d'autres instruments scientifiques), et l'introduction de nouveaux outils mathématiques dans les théories de mécanique des fluides, notamment les modèles mathématiques, la statistique et le calcul des probabilités, outils qui sont loin d'être des mathématiques pratiques.

Kampé de Fériet : un prisme pour comprendre les enjeux de la mécanique des fluides entre 1915 et 1945

Cette façon d'opérer pose naturellement une question : comment aborder ce sujet dans toute sa complexité, en prenant en compte la trajectoire d'un individu et ses croisements avec l'histoire institutionnelle, l'histoire des mathématiques, l'histoire de la physique et de l'aéronautique ? C'est cette question qui nous a conduit au concept de *prisme* . Il s'agit d'utiliser le parcours scientifique et institutionnel de Joseph Kampé de Fériet - de sa mobilisation scientifique à la Commission de Gâvre (1915) à l'année de sa démission de la direction de l'IMFL (1945) - en tant que prisme pour répondre à des questions plus générales concernant la mécanique des fluides en France entre 1915 et 1945, dont certaines, mais pas toutes, sont communes aux autres domaines des mathématiques appliquées.

Dans ce cadre, il est évident que nous sommes loin de définir ce travail comme une biographie stricto sensu. Les raisons de cela relèvent autant de la période envisagée (1915-1945) que de l'objet d'étude et de sa particularité, qui nous amènent à ne prendre en compte qu'une partie de sa vie et de ses identités dans différents champs disciplinaires, professionnels et académiques. Kampé de Fériet a eu une longue vie, de 1893 à 1982. Son abondante production textuelle, parfois non publiée pour des raisons militaires, touche un grand nombre de domaines des mathématiques pures et appliquées dont chacun correspond à une identité sociale et une époque déterminée. Durant sa vie, il a été étudiant de Paul Appell, il a été mathématicien, il a été expérimentateur, il a été directeur d'un institut de sciences appliquées, il a été académicien, il a été membre d'une institution militaire. Spécialiste de niveau international en mécanique des fluides, ses recherches ne concernent pas seulement ce domaine mais embrassent l'analyse, la balistique théorique et expérimentale, le calcul des probabilités, la mécanique statistique des milieux continus et, plus tard, après sa retraite en 1964, la théorie de l'infor-

mation [8]. De plus, sa contribution à la mécanique des fluides continuera après la guerre, une fois qu'il a quitté l'IMFL. Cependant, elle n'abordera pas les questions expérimentales comme auparavant. Dans la constitution de notre prisme, nous avons centré notre travail sur trois identités de Kampé de Fériet qui agissent dans le domaine de la mécanique des fluides théorique et expérimentale et sur son institutionnalisation : en tant que mathématicien, en tant qu'expérimentateur et en tant que directeur d'un institut de sciences appliqués. C'est seulement dans le cas où cela nous apparaissait pertinent, lors de la problématisation de notre travail, que nous avons mentionné les autres domaines et les autres identités. En particulier, il nous a semblé pertinent d'analyser dans le détail sa contribution à la balistique pendant sa mobilisation à la Commission de Gâvre, qui montre des éléments de continuité intéressants avec sa contribution à la mécanique des fluides de l'après-guerre, éléments qui sont cruciaux pour comprendre les effets de la guerre sur le panorama mathématique moderne en temps de paix.

Ces trois identités axées sur la mécanique des fluides, qui n'existent simultanément que dans la période entre 1915-1945, constituent dans notre travail l'élément central de la compréhension de l'état de la mécanique des fluides française de cette période, de ses problématiques générales et de ses enjeux par rapport au contexte international. Elles justifient également les raisons pour lesquelles Kampé de Fériet, le prisme, apparaît comme un candidat parfait pour une telle entreprise dans laquelle la biographie n'est pas le but ultime mais un outil.

Pour élaborer ce prisme constitué de l'enchevêtrement des diverses identités d'un mathématicien qui se croisent avec les diverses dimensions d'un institut scientifique tel que l'IMFL, nous nous sommes inspirés des approches biographiques et institutionnelles modernes. Les points de départ de notre enquête méthodologique ont été les ouvrages collectifs *Les uns et les autres... : Biographies et prosographies en histoire des sciences* édité par Philippe Nabonnand et Laurent Rollet et *Méthode et Histoire : Quelle histoire font les historiens des sciences et des techniques ?* sous la direction d'Anne-Lise Rey. Même s'il ne s'agit pas d'une biographie, les approches biographiques modernes se révèlent très efficaces pour reconstruire les identités de Kampé de Fériet qui nous intéressent, en fonction de son rôle de "participant et filtre de sa culture", comme le remarque Karen Parshall :

> "The goal of the biographer of a mathematician is to understand them as such, to analyze the forces that shaped them as individuals and

8. Des éléments biographiques centrés surtout sur sa production en analyse, calcul des probabilités et mécanique statistique sont rassemblés dans l'article rédigé par Jean Delporte, un étudiant de Kampé de Fériet [Delporte 2002]. Cet article contient aussi une bibliographie complète de ses œuvres.

> as mathematicians, to examine their reactions to those forces, to illuminate the life they led and how they led it. As a methodology for the history of mathematics, then, biography can provide a window not only onto the creative process of the mathematician but also onto the mathematician as a participant in and filter of his or her culture." [Parshall 1999, 292]

Les historiens Marta De Almeida et Antonio A.P Videira partagent les mêmes choix méthodologiques dans le cas plus général de l'histoire des sciences du XX^{e} siècle, en montrant l'exemple de deux trajectoires différentes, celles d'Emílio Ribas et de Guido Beck, qui ont pratiqué respectivement la médecine et la physique au Brésil :

> "Nous sommes de l'avis que les biographies des scientifiques comme Ribas et Beck rendent possible le renouvellement de l'étude historiographique sur le surgissement, et surtout sur la consolidation, de la science au Brésil et en Amérique du Sud. [..] Un renouvellement des études est rendu possible dans la mesure où les vies de Beck et Ribas ne peuvent être comprises que si elles sont mises en rapport avec d'autres trajectoires. [..] Ribas et Beck peuvent être vus comme étant des nœuds de réseaux. [...] les deux scientifiques concernés dans cet article ont pu avoir une force considérable dans les institutions où ils ont travaillé sans être des génies"[...]" [Videira et Marta 2013, 334]

Sous la base de ces deux approches, la trajectoire de Kampé de Fériet sera un outil efficace pour faire ressortir l'état de la mécanique des fluides à travers la reconstitution de son processus créatif en tant que spécialiste de mathématiques appliquées, de ses liens scientifiques et institutionnels avec les acteurs interagissant directement ou indirectement avec lui, de son rôle de "nœud de réseau" entre le contexte local de Lille, le milieu parisien autour du "patron" Henri Villat et la communauté internationale de la mécanique des fluides structurée autour du pôle américain de Theodore von Kármán, et enfin des raisons de sa valeur scientifique au niveau international ainsi que de son poids institutionnel même s'il n'est ni normalien, ni polytechnicien, ni agrégé.

Sur un autre plan, la lecture des approches biographiques et de leurs méthodologies nous a amenés à réfléchir sur d'autres aspects de la mise en place de notre démarche. Plus précisément, s'est posée la question de bien distinguer le degré de subjectivité et d'objectivité des éléments réfractés, réfléchis ou dispersés par le prisme de Kampé de Fériet dans le cadre de l'analyse de quelques aspects généraux de la mécanique des fluides. Il a fallu faire attention à ne pas tomber dans les dangers d'un trop fort "radicalisme représentationnel qui réduit les acteurs à n'être que des échantillons statistiques" [Rollet et Philippe 2012, 13]. Dans notre

cas, cela revient à dire qu'il a fallu faire attention à ne pas réduire la biographie de Kampé de Fériet à celle d'un représentant de l'ensemble de la mécanique des fluides française entre 1915 et 1945, en essayant de discerner ce qui appartient à l'unicité de sa trajectoire individuelle (y compris sa façon de voir et de faire la mécanique des fluides) et les éléments permettant de répondre à des questions plus générales concernant l'histoire de ce domaine. Pour le dire autrement, nous n'avons pas pu mettre de côté les questions soulevées par l'intégration de l'étude de la biographie de Kampé de Fériet dans une perspective de généralisation. Ces questions sont mises en évidence par Sabina Loriga dans son analyse des frontières entre biographie et histoire :

> "Au contraire de la biographie, genre littéraire sereinement fondé sur l'unicité d'une existence, l'histoire doit reconstituer un tissu social et culturel plus vaste. Il s'agit d'un principe fondamental, qui pourtant a été souvent confondu avec celui de la représentativité : le travail de contextualisation ressemble alors de manière inquiétante à l'homologation d'un échantillon statistique" [Loriga 1996, 229]

Dans le cas d'Evariste Galois, Caroline Ehrardt fait émerger une problématique similaire :

> "En fait, étudier Galois comme mathématicien consiste à caractériser et à faire tenir ensemble deux objets historiques distincts : un monde que l'on peut espérer tenir pour réel et objectif, soit le milieu mathématique du début du XIX^{e} siècle tel qu'il nous est bien connu grâce à une importante historiographie, et le monde subjectif tel qu'il se présente aux yeux de Galois. Le milieu scientifique des années 1830 tel que Galois le donne à voir ne correspond pas exactement à celui que l'historiographie a mis au jour, mais l'éclairage fourni par ce personnage permet aussi de poser des questions nouvelles à propos du contexte dans lequel il est évolue." [Ehrhardt 2012, 109]

C'est pour cette raison que notre travail a été très attentif à discerner les éléments qui peuvent donner des renseignements sur les questions générales du domaine et ceux qui apportent une certaine originalité à la trajectoire de Kampé de Fériet et aux acteurs qui l'entourent. Ces dernières n'ont pas été rejetées mais valorisées dans les limites du possible, naturellement sans oublier le but de la thèse.

Pour revenir à la construction de notre prisme, il ne sera assemblé complètement qu'en inscrivant la trajectoire de Kampé de Fériet dans une autre histoire, celle de l'IMFL. A ce propos, nous nous sommes appuyés sur l' approche institutionnelle moderne adoptée par l'historien Jérôme Lamy dans l'étude de l'Observatoire de Toulouse aux XVIII^{e} et XIX^{e} siècles :

> "Les espaces savants peuvent être considérés comme des matrices d'existence sociale, au sein desquelles s'élaborent de nombreuses expériences individuelles ou collectives. L'observatoire apparaît alors comme un espèce pluriel, doté de multiples dimensions qui le fondent, le définissent et l'organisent." [Lamy 2013, 448]

Dans le but de définir l'ampleur temporelle de son étude, Lamy a mis en place une division tripartie du temps où "il est possible d'organiser l'étude d'un espace savant qui "doit s'entendre comme un déplacement permanent entre les événements foisonnant d'un quotidien éclaté et les évolutions séculaires de l'ensemble des structures sociales" [Lamy 2013, 449-450], dont les variations d'échelles deviennent un "outil conceptuel intéressant pour analyser les évolutions historiques d'une institution scientifique" pour montrer "comment les acteurs locaux s'approprient des régimes de savoir et les reconfigurent en tenant compte du contexte politique et social toulousain" [Lamy 2013, 455]. Dans notre cas, même si la division temporelle et le choix conséquent des "rythmes braudéliens" [Lamy 2013, 449] ne sont pas pertinents à cause de la période envisagée, qui considérablement plus courte (1915-1945), les concepts de variation d'échelle et d'institut définis par une pluralité de dimensions, nous ont fourni des pistes de réflexion lors de la reconstruction de la vie de l'IMFL. Ainsi, dans le respect de la question de l'équilibre entre subjectivité et objectivité des éléments détectés, les différentes dimensions de l'IMFL ont un rôle double au sein du prisme. D'un côté, elles mettent en lumière les dynamiques que l'IMFL a en commun avec les autres pôles de mécanique des fluides disséminés sur tout le territoire (Lille, Marseille, Toulouse, Caen, Lyon, Strasbourg, Nantes et Poitiers). Il s'agit de dynamiques qui dépendent d'un programme national établi par le ministre de l'Air auquel tous les pôles sont soumis : les cours, les enseignements et certaines recherches, la nature des financements. De l'autre côte, elles font ressortir un institut immergé dans la réalité de Lille, et reconfiguré par cette ville selon son contexte scientifique, politique et industriel.

Dans ces circonstances, le concept du prisme mis en place pour ce travail nous amène à une importante harmonisation entre une étude plus ponctuelle, micro-historique de l'histoire de la mécanique des fluides française et une étude plus globale, selon une perspective suggérée par Jacques Revel dans *Jeux d'échelles : la micro-analyse à l'expérience* :

> A la hiérarchie des niveaux d'observation, les historiens réfèrent instinctivement une hiérarchie des enjeux historiques : pour exprimer les choses trivialement, à l'échelle de la nation, on fait de l'histoire nationale ; à l'échelle locale, de l'histoire locale. Saisie au ras du sol, l'histoire d'un ensemble social se disperse, en apparence, en une myriade d'événements minuscules, difficiles à organiser. La conception

> traditionnelle de la monographie cherche à le faire en se donnant pour tâche la vérification locale d'hypothèses et de résultats généraux. Le travail de contextualisation multiple pratiqué par le micro-historiens part de prémisses très différentes. Il pose, en premier lieu, que chaque acteur historique participe, de façon proche ou lointaine, à des processus - et donc s'inscrit dans des contextes - de dimensions et de niveaux variables, du plus local au plus global. Il n'existe donc pas d'hiatus, moins encore d'opposition entre histoire locale et histoire globale. Ce que l'expérience d'un individu, d'un groupe, d'un espace permet de saisir, c'est une modulation particulière de l'histoire globale [Revel et des hautes études en sciences sociales 1996, 26].

Ainsi, les problématiques générales de la mécanique des fluides abordées dans cette thèse se croiseront avec les discours, les pratiques et les expériences des individus qui participent à l'évolution scientifique et institutionnelle de ce domaine sur une échelle locale, nationale et internationale. Ce croisement multi-échelle est rendu possible en utilisant comme fil directeur la trajectoire de Kampé de Fériet, grâce à son rôle au sein de l'IMFL et à sa mobilité géographique qui crée un important réseaux d'individus. L'analyse micro-historique permet dans ce contexte de faire ressortir le caractère polycentrique de ce domaine, un caractère donné non seulement par les individus mais aussi par les divers instituts français et étrangers de mécanique des fluides, d'aéronautique, de météorologie et plus en général des mathématiques appliquées qui sont en relation avec l'IMFL et Kampé de Fériet. [9] Ici, le jeu d'échelle permet d'aller du cas particulier au cas général et vice versa, en traitant les problématiques générales de la mécanique des fluides française pendant l'entre-deux guerres sans oublier une analyse centrée sur les individus et sur les instituts, capable d'enrichir ce travail avec un récit d'écriture plus complexe et moins linéaire capable de mettre en lumière le caractère polycentrique et trandisciplinaire de ce domaine.

Dans ce cadre, les approches méthodologiques discutées ci-dessus ont permis la mise en œuvre d'un prisme très efficace pour poursuivre notre objectif. Bien que l'analyse qui en découle ne soit pas exhaustive, ce prisme s'est révélé un bon outil pour répondre à des questions presque inexplorées au sein de la littérature secondaire existante.

9. C'est le même polycentrisme qui caractérise l'histoire de l'Italie, une histoire dont, d'après les micro-historiens Carlo Ginzburg et Carlo Poni, "les enquêtes micro-historiques offrent la démarche la plus adéquate pour exploiter cette extraordinaire accumulation des séries documentaires conservées dans les dépôts d'archives de la péninsule " [Ginzburg et Poni 1981, 5].

Plan de la thèse

Notre étude est organisée autour de quelques questions générales caractérisant le contexte de la mécanique des fluides en France, questions auxquelles nous essayerons de répondre à travers le prisme de Kampé de Fériet et l'IMFL. Ces diverses questions sont regroupées en cinq axes thématiques différents, un par chapitre. L'ordre des chapitres est chronologique et il suit les diverses étapes de la vie de Kampé de Fériet, de la première guerre mondiale à la seconde guerre mondiale. Au même temps, l'ordre est aussi thématique, ce qui n'exclut pas la possibilité de trouver, dans un chapitre, des questions qui remontent à une période précédente ou ultérieure par rapport à celle qui fait l'objet du chapitre. Les diverses identités de Kampé de Fériet relativement à la mécanique des fluides figureront graduellement au cours des chapitres, en fonction de la spécificité de l'axe thématique abordé.

Le chapitre 1 est entièrement consacré à la première guerre mondiale et à l'engagement des mathématiciens au sein de la Commission de Gâvre. En suivant le fil rouge de l'activité de Kampé de Fériet, nous verrons comment ils ont appliqué leurs connaissances de mathématiques pures établies antérieurement à la guerre pour permettre un avancement remarquable de la balistique, du point de vue analytique et numérique. Nous nous interrogeons sur la question de l'utilité des mathématiques pures et des mathématiciens dans les institutions militaires telles que la Commission de Gâvre. Ensuite, nous passerons à l'analyse des influences réciproques de la balistique et de l'hydrodynamique ainsi qu'à l'apport des mathématiciens à la balistique expérimentale dans le cadre de l'établissement de collaborations avec des personnalités hors des mathématiques. Ce chapitre est crucial pour comprendre le rôle des mathématiques et des mathématiciens au sein de la mécanique des fluides de l'après-guerre, car les éléments de continuité avec la période du conflit ne sont pas absents.

À partir du chapitre 2, nous entrerons complètement dans le champ de la mécanique des fluides pour envisager un autre axe thématique, celui de l'institutionnalisation de ce domaine. Cet aspect est marquant dans l'histoire de ce la mécanique des fluides, puisque jusqu'aux années 1920, aucune chaire n'était prévue pour ce domaine, même pas dans les laboratoires d'hydraulique nés au début du siècle au sein des Instituts Électrotechniques, notamment ceux de Grenoble, Toulouse et Nancy. Cet axe sera étudié à partir de l'IMFL, dont l'histoire sera reconstruite de sa création à son évolution jusqu'en 1939 en mettant au jour quels en ont été les collaborateurs, l'outillage scientifique, la nature des financements et les accords université-Etat-industrie, les enseignements, la recherche pour l'industrie locale, l'impact du contexte lillois sur l'activité de l'institut ainsi que celui du

programme national établi par le ministre de l'Air.

L'axe thématique du chapitre 3 aborde une question qui a été au cœur de l'histoire de la mécanique des fluides depuis plusieurs siècles : les difficultés de rapprochement entre le monde théorique et le monde expérimental. Ces deux mondes se rapprochent de plus en plus au XX^{e} siècle grâce à l'émergence de l'aviation et des nouveaux problèmes concernant l'écoulement de l'air. En examinant le cas particulier de la théorie de la turbulence, le chapitre vise à mettre en lumière le fait que même la France, comme d'autres pays, a participé activement à ce type de rapprochement, à travers la création de théories toujours plus applicables, le perfectionnement de son outillage scientifique dans ses laboratoires, et l'encouragement des mathématiciens à se tourner vers le travail en équipe. Le rôle joué par Kampé de Fériet en tant qu'expérimentateur permettra d'évoquer des acteurs et des institutions qui ont été presque oubliés par la littérature secondaire, notamment l'école de la turbulence de Philippe Wehrlé et Georges Dedebant au sein de la Commission de la Turbulence Atmosphérique - dont Kampé de Fériet faisait partie- et d'autres auteurs français et étrangers qui ont joué un rôle considérable dans ce chapitre particulier de la mécanique des fluides.

En revanche, le chapitre 4 fera appel à Kampé de Fériet en tant que mathématicien pour analyser la question de la mathématisation de la mécanique des fluides dans les années 1920-1940, caractérisées par l'introduction de nouveaux outils mathématiques, notamment la statistique et le calcul des probabilités. Dans ce but, nous illustrerons le cas de l'approche probabiliste développée par Kampé de Fériet pour la théorie de la turbulence. Afin de montrer les aspects novateurs de cette nouvelle façon de mathématiser la mécanique des fluides, nous la comparerons avec celle d'Henri Villat, qui présente des outils mathématiques (théorèmes modernes de l'analyse), des approches (priorité à l'applicabilité et non à l'application), et des sujets (la théorie de la résistance d'un fluide) complètement différents. De façon plus générale, nous discuterons l'hypothèse selon laquelle cette approche fait ressortir un nouveau profil de mathématicien au sein du paysage mathématique moderne de l'après-guerre : le profil du *real applied mathematician*, qui partage de nombreuses caractéristiques avec d'autres spécialistes de mathématiques appliquées étrangers comme Theodore von Kármán et Norbert Wiener aux États-Unis, Geoffrey Taylor en Royaume-Uni, Ludwig Prandtl en Allemagne, et Andrej Nikolaevič Kolmogorov en Russie. D'un côté, les rapports entre Kampé de Fériet et les probabilistes français comme Paul Lévy et Maurice Fréchet se révéleront très précieux pour comprendre les influences réciproques du calcul des probabilités et de la mécanique des fluides ; de l'autre, ses fortes liaisons avec le milieu américain de Von Kármán, nous permettront d'apporter des éléments nouveaux concernant

l'historiographie de ce dernier ainsi que ses liens avec la France.

Enfin, dans le chapitre 5, nous examinerons le rôle de l'IMFL pendant la seconde guerre mondiale dans le cadre du travail en clandestinité de son personnel pendant son repli à Toulouse. D'un côté, nous essayerons de donner quelques éléments plus généraux touchant les autres instituts de mécanique des fluides. De l'autre, nous nous concentrerons sur un étudiant de Kampé de Fériet, Naftali Frenkiel, un physicien d'origine polonaise, qui a réalisé sa thèse et un grand nombre de travaux expérimentaux caché dans la chapelle toulousaine où l'IMFL avait créé son laboratoire expérimental. Déporté en 1943, il quittera la France après la guerre pour les États-Unis, où il deviendra un spécialiste de la théorie de la turbulence de niveau international ainsi que l'un des fondateurs de la communauté de mécanique des fluides américaine grâce à la création de la revue *Physics of Fluids* en 1958.

Sources et archives consultées

Ce travail s'appuie sur un grand nombre de documents d'archives, ce sujet étant presque inexploré. Le travail d'archives a occupé une bonne partie de l'activité de recherche. Tout d'abord, un important travail d'archive a été effectué à l'ONERA de Lille (ex IMFL), dans le cadre d'une convention de collaboration d'une durée d'un an. Grâce à cette collaboration, nous avons pu travailler dans le fonds Kampé de Fériet. La richesse de ce fonds nous a permis non seulement d'étudier la vie institutionnelle et scientifique de Kampé de Fériet mais aussi de donner vie à l'histoire de l'IMFL, de ses collaborateurs et, plus généralement, au contexte général de la mécanique des fluides en France. Parallèlement, nous avons consulté les documents contenus dans les archives de Météo France à Paris.

Afin de reconstruire les liens entre Kampé de Fériet et le contexte international de la mécanique des fluides, en particulier ses relations avec le milieu américain, nous avons consulté sa correspondance avec Theodore von Kármán (Archives de Caltech, Pasadena, California) et avec Norbert Wiener (Archives du MIT, Cambridge Massachusetts). Cela nous a permis aussi de pallier les difficultés liées au fait que dans le fonds Kampé de Fériet, il n'y a que peu de lettres qui nous sont parvenues.

Dans certains cas, nous avons rencontré quelques limites à ce travail qui sont propres à la nature militaire (ou plus généralement confidentielle) des sources consultées ainsi qu'à la période encore considérée comme récente. Il a été difficile de trouver des sources numérisées ou classées dans les archives. C'est le cas des

archives du Service Historique de la Défense (Archives de la Marine) à Lorient où les rapports d'essais et d'expérimentation des archives de Gâvre - mis en caisses et enterrés pendant la Seconde Guerre mondiale, ils ont échappé aux recherches et aux bombardements et ont été récupérés à la libération - n'étaient pas reliés mais mis en chemises dans des cartons. Sans inventaire, la consultation était déterminée par le hasard. Cependant, c'est grâce au hasard que nous avons trouvé, par exemple, un dossier technique de Kampé de Fériet confirmant son rôle très actif à Gâvre dans le cadre de la balistique expérimentale.

En ce qui concerne d'autres sources qui se rapportent à la Commission de Gâvre, nous avons consulté les Archives du Service Historique de la Défense de Vincennes, le fonds Châtelet des Archives départementales du Pas-de-Calais et le dossier de la Commission Balistique de l'Académie des Sciences conservé aux archives de l'Académie, où nous avons également consulté le dossier de Kampé de Fériet en tant qu'académicien dans la section de mécanique.

Enfin, l'immersion de l'IMFL dans le contexte lillois a été possible grâce aux documents conservés aux archives de l'ASA de l'Université Lille et aux Archives Départementales du Nord.

On note donc un ensemble d'archives très varié, dans des villes différentes en France et à l'étranger, et dont la consultation s'est déroulée de façons diverses, correspondant à des degrés plus ou moins élevés de difficulté de recherche des sources. C'est surtout grâce à l'aide des responsables des archives que la richesse des documents retrouvés et consultés a pu contribuer à jeter les bases d'un terrain presque inexploré comme celui de la mécanique des fluides pendant l'entre-deux-guerres.

Chapitre 1

La mécanique des fluides de la Grande Guerre à l'entre-deux-guerres

> Mais, dans Syracuse assiégées, Archimède appliquait la rigoureuse justesse de la Géométrie à la construction des catapultes géantes : quel est donc le savant dont l'esprit resterait sourd à l'appel de la patrie en danger ?
>
> Paul Painlevé (le 7 janvier 1918)

Aux alentours des années 1930, au-delà des mathématiques pures et du mouvement bourbakiste émergent, l'attention des mathématiciens se dirige également vers un autre milieu mathématique, celui des mathématiques appliquées, à la fois sur un plan scientifique et institutionnel. Mouvement Bourbaki et mathématiques appliquées s'opposent, bien sûr, mais tous les deux ont connu les mêmes effets de la première guerre mondiale. Ce qui change est la réaction à ces effets : l'un la refuse et cherche la pureté des mathématiques, l'autre, au contraire, constitue une continuité en temps de paix de tout ce qui s'est instauré pendant le conflit. En partant de ce dernier aspect, celui de la continuité, quels sont les effets de la guerre sur le rôle des mathématiciens dans la communauté mathématique pendant l'entre-deux-guerres ?

En premier lieu, la génération académique des "anciens" de Paul Appell, Émile Picard, Édouard Goursat, Léon Lecornu, Ernest Vessiot, laisse la place aux *nouveaux patrons* à savoir les mathématiciens qui ont soutenu leur thèse de doctorat

aux alentours de 1900 et qui ont été - sauf quelques exceptions comme Joseph Pérès - [1], des importants acteurs pendant la Grande guerre. Par exemple, Arnaud Denjoy, Georges Valiron et Ernest Esclangon étaient mobilisés à la Commission de Gâvre ; Paul Montel et Jules Drach travaillaient auprès de la Direction des inventions intéressant la défense nationale, dont Emile Borel a été nommé à la tête du cabinet technique [Aubin et Goldstein 2014b, 153]. Henri Villat, affecté au centre balistique de Bourg d'Oisans, calculait des tables de tir contre les aéronefs [Aubin 2006, 14] ; Maurice Fréchet a été envoyé comme interprète auprès de l'armée britannique [Mazliak 8 mars 2010] ; enfin, il y a Gaston Julia, blessé le 15 janvier 1915 pendant sa mobilisation sur le Chemin des Dames [Audin 2009a]. Plus généralement, l'engagement scientifique des jeunes mathématiciens en temps de guerre a conduit ces derniers vers un nouveau rôle institutionnel dans la société moderne et la reconstruction des institutions mathématiques, de l'éducation et de la recherche dans toute la France [2]. Une partie d'entre eux est envoyée dans les provinces afin d'y importer des nouveaux enseignements, recherches et institutions : le relation entre Paris et les provinces change [Aubin et. al. 2014, 161] [3]. A Paris, Émile Borel fonde l'Institut de statistique de l'université de Paris (ISUP) en 1922 et en 1924 l'Institut Henri Poincaré (IHP), dont le but est de promouvoir la recherche et l'enseignement concernant la physique mathématique, la théorie de la probabilité et la statistique mathématique Siegmund-Schultze [2009a]. Ernest Esclangon sera nommé directeur de l'Observatoire astronomique de Strasbourg en 1919 [Heck 2005] alors que Albert Châtelet sera recteur de l'université de Lille en 1924 et il s'engagera pour la reconstruction et la construction des instituts des sciences appliquées de Lille, y compris l'IMFL. Henri Eyraud, directeur de l'ISFA (Institut de Science Financière et d'Assurances) à l'Université de Lyon [Aubin et Goldstein 2014b, 161]. Maurice Fréchet à Strasbourg et Georges Bouligand à Poitiers jouent un rôle fondamental dans la formation de la vie mathématique de

1. Le cas de Pérès est particulier, puisqu'il semble que son parcours personnel et scientifique ne soit pas troublé par la guerre. En effet, pendant le conflit, en ayant eu la chance d'être exempté par le service militaire, il a enseigné dans une école secondaire à Montpellier. Pour son cas voir [Mazliak et Tazzioli 2009, 155-164].

2. Pour les effets du conflit sur la communauté mathématique française de l'après-guerre voir [Aubin et. al. 2014, 157-168].

3. Sur la décentralisation de la Faculté des Sciences de Paris, voir la thèse de Juliette Leloup [Leloup 2009]. Après la guerre, Paris détient encore le monopole mais, progressivement et à partir des années 1930, les thèses des provinces vont toujours plus augmenter jusqu'à l'éclat de la seconde guerre mondiale. Elle examine le cas de Poitiers, Strasbourg, Montpellier et Lyon, en jetant un coup d'œil aux villes de Lille, Caen et Nancy. Sur la totalité de 84 thèses soutenues en France entre 1900 et 1915, seulement 12 ont été soutenues en province. Le processus de décentralisation aura lieu, bien que lentement, à partir des années 1930 où on commence à donner de la voix aux faculté des provinces. Voir à ce propos la table 1. 2 pour le nombre de thèses soutenues à Paris et en province entre 1900 et 1914 [Leloup 2009, 55] et la table 3.1 [Leloup 2009, 107] pour le nombre de thèses soutenues dans les facultés des sciences de province et à Paris entre 1914 et 1945.

ces deux villes de province [4]. Un dernier exemple est la ville de Besançon, dont la direction de l'institut de chronométrie sera confiée à Jules Haag en 1927.

En second lieu, grâce à la guerre, certains mathématiciens découvrent un intérêt renouvelé pour la sphère des mathématiques appliquées (la statistique, la mécanique des fluides, la probabilité, l'aviation, l'astronomie, la météorologie, la chronométrie etc.), intérêt promu par de nouvelles institutions, sponsors privés ainsi que par des nouvelles collaborations avec les ingénieurs, les militaires et les industries [Aubin et. al. 2014, 159]. Par exemple, à la Commission de Gâvre, Haag utilise le calcul des probabilités et collabore avec des officiers de l'Artillerie Navale pour la mise en place d'une méthode numérique de calcul d'une trajectoire ; après la guerre il dirigera son attention vers l'horlogerie et les engrenages [5]. Georges Darmois, "un passeur entre le monde industriel et le monde académique" pendant la guerre, dirigea l'attention vers le caractère aléatoire des mathématiques :

> "La guerre de 1914-1918, en m'orientant vers la balistique et les problèmes de tir, puis vers le repérage du son et les problèmes de mesure et de propagation des ondes, a très fortement infléchi mon esprit vers la Physique mathématique et le Calcul des probabilités" [Mazliak 2010, 9]

Il jouera plus tard un rôle central dans la diffusion de la statistique en France sous le modèle anglais de Pearson, en mettant l'accent sur son importance dans la production industrielle [6].

Pour résumer, cette réorientation vers les mathématiques appliquées et leur institutionnalisation représente une volonté de maintenir, en temps de paix, les liens établis en temps de guerre entre science et industrie, science et état et entre les Nations Alliées [Aubin et. al. 2014, 158] ainsi que certaines approches plus pratiques à l'égard des mathématiques. De plus, ce rôle accru des mathématiciens appliquées fut noté déjà à l'époque par Albert Châtelet [7]. En effet, au cours de la cérémonie de la pose de la première pierre du bâtiment de l'IMFL, le recteur de

4. Pour les pôles de province des années 1920-1930 créés par les deux mathématiciens pendant l'entre-deux-guerres voir par exemple [Leloup 2009, 108] pour Strasbourg et [Leloup 2009, 115] pour Poitiers.

5. Avant de sa mobilisation à Gâvre, ses recherches étaient autour des familles de Lamé et d'équations différentielles, fonctions harmoniques et biharmoniques. Voir son CV sur la base de données Leonore.

6. Georges Darmois (1888-1961) s'occupera de défense anti-aérienne contre les attaques de basse altitude et plus tard sera affecté dans la section 25 de repérage au son, sous le commande du physicien Gustave Ribaud (1884-1963). Au milieu des années 1920, Borel, très occupé par la politique, décide de lui confier son cours de Probabilité et Statistique à l'ISUP.

7. Sur Albert Châtelet voir [Gauthier 2018].

l'Université de Lille, Albert Châtelet, avait fortement insisté sur l'importance des effets du conflit sur le panorama mathématique des années 1920 :

> "Cette collaboration fleurit pendant la guerre : les problèmes se posaient en foule à qui il fallait donner des solutions rapides et pratiques. En installant des Polygones d'expériences, des usines, des souffleries, des laboratoires, on fit appel à la collaboration de toutes les bonnes volontés : industriels, ingénieurs, professeurs, savants s'attelaient à la même besogne, le théoricien savait s'abaisser jusqu'à la pratique, le praticien n'hésitait pas à demander conseil au calculateur. Cette entente, née dans la nécessité, donnait des résultats admirables. "

Et il continue :

> "On a pu croire que la paix allait la détruire, le mathématicien était retourné à son tableau noir et ne jonglait plus qu'avec des symboles abstraits, le physicien et le chimiste retrouvaient non sans joie, leurs laboratoires et leurs spéculations, l'ingénieur retrouvait un certain mépris pour la théorie et préférait s'en remettre à son flair et à sa pratique,le constructeur d'avions croyait son industrie à peu près stabilisée et voyait moins la nécessité d'essais méthodiques et de recherches scientifiques." [8]

Dans ce chapitre nous nous intéressons à un domaine bien précis des mathématiques appliquées, à savoir la mécanique des fluides. Le but est de comprendre quels sont les éléments de continuité entre la mécanique des fluides et la guerre ; en d'autres termes quels sont les effets de la guerre sur ce domaine si l'on prend comme point de départ la mobilisation des mathématiciens dans les institutions militaires. A partir des années 1920, la mécanique des fluides devient un enjeu économique national devant être institutionnalisée et dont l'applicabilité des théories est considérée comme essentielle par les ingénieurs aussi bien que par les physiciens et les mathématiciens. Ces derniers changent leurs approches et tous collaborent pour mettre à l'épreuve des théories toujours plus applicables. Déjà avant la première guerre mondiale, Paul Painlevé était convaincu que l'aviation devait jouer un rôle militaire fondamental dans le futur. Ainsi, il s'engage pour réorganiser la recherche et l'enseignement de l'aéronautique sur une échelle nationale, [9] et participe à la création de l'École supérieure d'aéronautique en 1908 et y donne le premier cours d'aviation. Une première chaire d'aviation a été créée en 1910 et sera confiée à Lucien Marchis jusqu'en 1933. Mais, "contrairement à l'opinion commune, l'aviation est un problème où la mécanique théorique peut rendre

8. [Archives de l'ONERA Lille, Fonds IMFL].
9. Voir [Anizan 2006] sur le rôle de Painlevé en matière d'aviation et aéronautique.

de très grands services et éviter des années de tâtonnements incohérents "[10]. Il faut donc avoir recours aux savants et à leurs compétences théoriques pour faire progresser l'aéronautique. En 1923 la création du pôle de mécanique des fluides à Paris a été fait en prenant comme modèle celui de la mobilisation scientifique des mathématiciens dans les institutions militaires, comme le constate en effet Anizan dans sa thèse :

> "À partir de 1923, Paul Painlevé est en outre nommé professeur titulaire de la chaire de mécanique des fluides et applications créée à la faculté des sciences de Paris et financée par le sous- secrétariat d'État aux Transport aériens. Il a inspiré l'institution d'un pôle scientifique qui vise, dans un esprit similaire à celui qui avait conduit à la mobilisation scientifique durant la guerre, à former des étudiants possédant de solides bases théoriques mais aussi rompus aux recherches appliquées et informés des plus récentes techniques utilisées et des derniers perfectionnements adoptés par l'industrie." [Anizan 2006, 782]

En résumé, la mécanique des fluides, qui se développe grâce aux questions posées par la guerre (avions, aérodynamique balistique, sous-marins etc.), devient, après le conflit, pas seulement un important centre d'intérêt pour les mathématiciens mais aussi un domaine dont l'institutionnalisation prend comme modèle celui de la mobilisation scientifique. Par conséquent, pour comprendre les diverses thématiques de la mécanique des fluides de l'entre-deux-guerres, il faudra comprendre ce qui se passe en 1914-1918 dans les institutions militaires.

Dans ce contexte, le chapitre vise à utiliser la mobilisation scientifique de Kampé de Fériet à la Commission de Gâvre pour comprendre les éléments de continuité entre la guerre et la mécanique des fluides [Figure 1.1]. Ce mathématicien participe activement à ce processus d'institutionnalisation et de mathématisation de la mécanique des fluides ainsi qu'à la création des liens avec les ingénieurs, physiciens et industriels dans la tractation des problèmes moins théoriques. C'est pendant sa mobilisation à Gâvre qu'il a commencé à s'intéresser aux questions expérimentales et à la mécanique des fluides lors de la résolutions de certains problèmes d'aérodynamique balistique à Gâvre. C'est aussi grâce à son séjour à Gâvre qu'il a été désigné comme le directeur de l'IMFL. Après la guerre, non seulement il quittera progressivement ses recherches d'analyse pour se consacrer presque uniquement à ce domaine, mais son institut de mécanique des fluides appliquera même ses méthodes de balistique appliquée à des problèmes hydrodynamiques. Il existe une continuité entre son expérience en temps de guerre et son expérience

10. Paul Painlevé, Conférence de septembre 1909 au cinquième congrès d'aéronautique de Nancy. Reproduit dans [Anizan 2006, 129].

en temps de paix ce qui nous porte à comprendre le rôle de la première guerre mondiale dans la mécanique des fluides de l'entre-deux-guerres. Plus précisément, sa trajectoire en tant que mathématicien fait ressortir deux types d'éléments de continuité *externes* et *internes*. D'un côté, le premier type ne concerne pas directement la mécanique des fluides et montre que certains paradigmes de la mécanique des fluides de l'entre-deux-guerres (mathématisation de la mécanique des fluides et son institutionnalisation, nouvelles collaborations avec les non-universitaires, importance de l'approche expérimentale à côté de celle théorique etc.) sont les mêmes qu'on peut retrouver dans le domaine de la balistique au cours des années 1914-1918. En analysant le cas de la balistique à la Commission de Gâvre nous pourrons remarquer que les formes d'approches et le type de collaboration sont nés et se sont développés selon les mêmes modalités. Ici, à partir du début du conflit, le Ministre de la Guerre pose des questions de balistique toujours plus complexes liées à l'arrivée de l'artillerie lourde et des avions, des questions que les officiers militaires ne pouvaient pas résoudre sans l'aide des mathématiciens. Ainsi, le personnel militaire de Gâvre comprend l'importance du potentiel intellectuel des mathématiciens et une collaboration entre les deux commence à prendre forme. De l'autre côté, les éléments de continuité internes concernent le rôle même de la mécanique des fluides pendant la guerre, dont les applications permettent de résoudre certaines questions de balistique.

Tout d'abord, après avoir donné quelques éléments institutionnels de la Commission de Gâvre, le chapitre se focalisera sur la mobilisation des mathématiciens dans cette institution (1ère section). Nous verrons également jusqu'à quel point leur apport mathématique est utile dans la Commission (2e section). Ensuite, il illustrera quelques exemples visant à comprendre comment les recherches théoriques des mathématiciens ont permis à la balistique un avancement remarquable du point de vue analytique et numérique dans les problèmes de l'intégration de la trajectoire d'un projectile ainsi que dans le calcul des perturbations d'une trajectoire. En d'autres termes, il s'agira de donner quelques exemples du processus de mathématisation d'un domaine technique comme la balistique, qui jusqu'à ce moment-là était traitée presque uniquement par les officiers militaires et les ingénieurs (3e section). Puis, le chapitre se dirigera vers les appareils d'enregistrement des vitesses d'un projectile de Kampé de Fériet et Foex, qui montrent comment un mathématicien pendant la guerre se familiarise pour la première fois avec des questions expérimentales en collaboration avec les physiciens et les ingénieurs (4e section). Enfin, il se concentre sur la mécanique des fluides et les outils qu'elle peut fournir à la balistique, notamment à l'aérodynamique balistique (5e section).

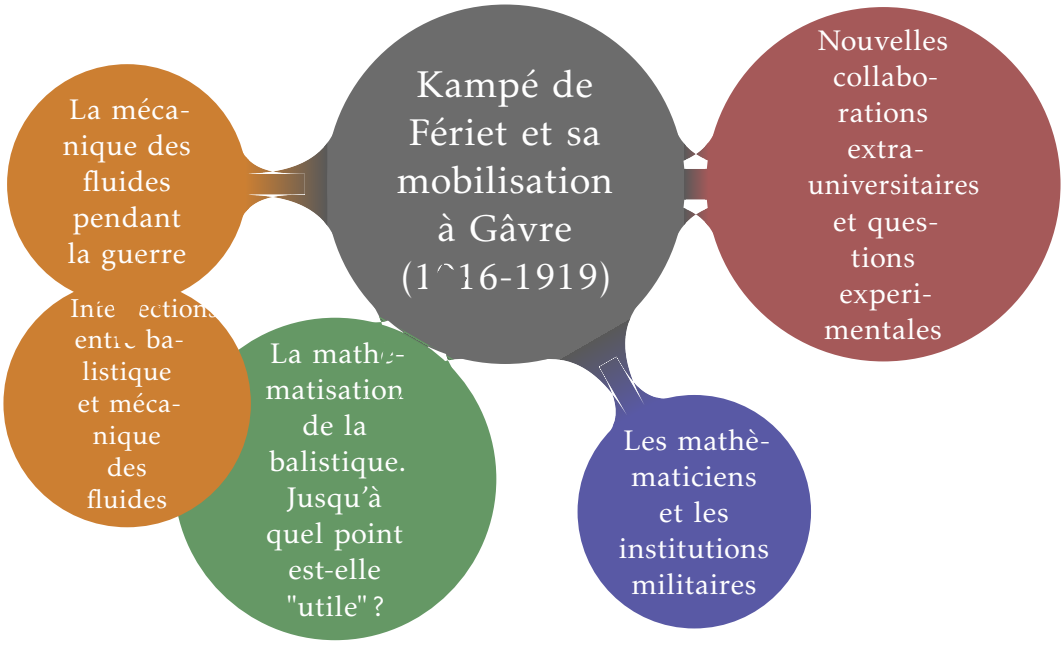


FIGURE 1.1 – Comme le montre ce schéma, la mobilisation de Kampé de Fériet à la Commission de Gâvre permet de répondre à plusieurs questions concernant les implications des mathématiciens pendant la première guerre mondiale et ses effets ultérieurs en temps de paix.

1.1 Mathématiciens et institutions militaires. La Commission de Gâvre

Les institutions militaires comme la Commission de Gâvre (1829) et la Commission des Inventions (1887) n'étaient pas ouvertes aux universitaires au moment de leur création. Les relations entre les scientifiques civils et les officiers militaires s'instaurèrent à partir du 1915 pour ce qui concerne la Commission de Gâvre et en 1894 pour la Commission des Inventions. Cette dernière était un organisme chargé de coordonner, examiner et transmettre aux services compétents toutes les propositions qui pouvaient intéresser les différents services militaires. Elle est née en 1887 sous le nom de *Commission d'examen des inventions intéressant l'armée* et était composée à l'origine uniquement par des militaires. En 1894, suite à un décret, la composition de la commission fut modifiée et les membres civils purent en faire partie. Ainsi, plusieurs savants furent nommés par le ministre de la guerre, y compris Appell et Boussinesq, ce qui marqua le début d'une nouvelle collaboration entre eux et les officiers militaires, renforcée plus tard (1914) avec la création de la *Commission Supérieure des Inventions* dont Appell était le président et qui comprenait 46 personnalités, y compris 20 académiciens. En novembre

1915, Paul Painlevé, en tant que ministre de l'Instruction publique institua une *Direction des Inventions* rattachée à la Commission dont Émile Borel fut à la tête du Cabinet Technique. [11]

L'intégration des mathématiciens à la Commission de Gâvre pendant la Grande Guerre est présentée par David Aubin [Aubin 2014]. L'auteur se focalise sur les difficultés de cette intégration, et les efforts des ingénieurs pour les inclure dans leur structure militaire marquée par une forte tradition, "l'esprit gâvrais", fondé sur l'acceptation d'une théorie à la seule condition qu'elle soit vérifiée du point de vue numérique. En France, les officiers militaires recevaient une première formation par l'École Polytechnique complétée par deux années dans une école d'artillerie [12]. Cela leur permettait d'avoir, outre un certain degré d'expertise en matière d'artillerie, des compétences très avancées au niveau mathématique aussi bien qu'en chimie et en physique. En particulier, les ingénieurs de l'artillerie navale, une fois sortis de l'École Polytechnique, suivaient les cours de l'École d'Application du Génie Maritime [13]. De l'autre côté, les jeunes mathématiciens, comparés aux officiers militaires n'avaient aucune préparation devant les problèmes posés par la guerre. Au contraire, aux États-Unis, l'intégration des mathématiciens était moins complexe car les officiers n'avaient pas les compétences mathématiques appropriées pour aborder certains problèmes, que seulement les universitaires pouvaient résoudre. Ici, le traité de balistique de Siacci [14], sera traduit et introduit dans les centres militaires américains par l'officier James Ingalls (1837-1927) en 1886. Les institutions les plus importantes où les mathématiciens étaient engagés furent l'Aberdeen Proving Ground (Maryland) dirigée par le mathématicien Oswald Veblen (1880-1960) et l'Ordnance Departement of the War Department (Washington, D.C.), incluant le groupe autour du mathématicien et astronome Forest Ray Moulton [15]. Une situation similaire se trouve en Grande Bretagne, notamment à Cambridge [Barrow-Green 2014]. A l'époque cette ville occupait un rôle dominant dans l'enseignement des mathématiques très avancées aux universités et l'offre des

11. Sur l'histoire de la Commission des Inventions voir [Roussel 1989] et [Galvez-Behar 2005].

12. Sur l'éducation mathématique du polytechnicien voir [Tournès 2012] et [Konstantinos 2009]. Sur le rôle de l'École Polytechnique pendant la guerre, voir [Chabert et Gilain 2014] qui analyse les effets de la guerre sur l'école, en prenant en compte le cours, les professeurs, l'organisation, et la place des mathématiques dans son milieu.

13. Lettre officiel du Ministre de la Marine au Préfet maritime de Lorient, le 23 septembre 1917 [SHD-Marine, série H, Archives de la Commission de Gâvre].

14. L'officier italien Francesco Siacci (1839-1907) est l'un des pionniers de la balistique rationnelle classique. Il fut un officier d'artillerie et professeur de balistique de la Scuola di Artiglieria di Applicazione d'Artiglieria e Genio de Turin. Son traité, *Balistica* (1888), sera traduit et diffusé en France en 1892.

15. Sur la mobilisation des mathématiciens américains voir par exemple [Gluchoff 2011] et [Archibald et Kent 2014].

ressources matérielles et intellectuelles pendant la guerre. Cependant le gouvernement britannique semble peu encourager leurs initiatives qui représentent plutôt des actions volontaires, non inclues dans un programme fixé par les politiques nationales. En Italie, à côté de l'importante tradition de balistique poursuivie par les disciples de Siacci comme Filippo Burzio (1891-1948), Ettore Cavalli (1861-1932) et Giovanni Bianchi (1861-1917), la position des mathématiciens italiens fait émerger un débat intellectuel visant à comprendre leur interventionnisme ou leur neutralisme à partir du 25 mai 1915 [Mazliak et Tazzioli 2014]. En Allemagne, les officiers militaires et les balisticiens avaient une solide préparation mathématique provenant des universités techniques. Un exemple est donné par Carl Julius Cranz (1858-1945), qui reçoit une formation mathématique et physique à Berlin et Tubingen et jouera un rôle crucial à l'Artillerie-Prufungskommission pendant la guerre. Son traité *Lehrbuch der Ballistik* (1910) constitue un manuel de référence pour la balistique allemande à l'époque. Quant à l'intégration des mathématiciens dans les institutions militaires allemandes pendant la première guerre mondiale, elle mériterait une étude plus ample.

Dans cette section, nous essayerons de donner quelques éléments nouveaux sur l'organisation de la Commission de Gâvre lors du conflit, sa difficulté face aux nouveaux problèmes posés par la guerre et l' appel aux mathématiciens qui s'ensuivit.

1.1.1 La Commission de Gâvre et son besoin du potentiel mathématique

Les expérimentations des matériaux des armées furent confiées aux arsenaux et aux écoles d'artillerie jusqu'à ce que le ministre de la Guerre et le ministre de la Marine décident de confier ces tâches à des établissements spéciaux, appelés "commissions d'expérience", créés au milieu du XIX^{e} siècle, à Gâvre, Calais, Châlon, Versailles, Quiberon et Bourges.

La commission de Gâvre était une institution maritime créée par le ministre de la Marine Hyde de Neuville le 22 juin 1829 sur décision du Ministre de la Guerre. Son polygone est né à Port Louis, un lieu stratégique en face de la plage de Gâvre, en proximité du port de Lorient et du littoral de Quiberon, lieux très peu fréquentés à l'époque. Le personnel englobait les ingénieurs de l'artillerie navale, de la marine et celui de l'artillerie coloniale. Son but était d'effectuer les essais et expérimentations techniques concernant plusieurs domaines théoriques et expérimentaux de l'artillerie, notamment la balistique, les poudres, les bouches à feu, le tir en mer, le tir aérien, le tir sous-marin, les obus explosifs, l'amorçage, les fusées,

les méthodes et instruments d'observation, l'établissement des table de tir, etc. Cet établissement était sous la tutelle de la Direction Centrale de l'Artillerie Navale, un organisme qui dépendait du Ministre de la Marine et, en même temps, répondait directement au Ministre de la Guerre [figure 1.2] et [figure 1.3]. Son activité était organisée sur la base d'une "co-direction" entre le Ministre de la guerre et Ministre de la Marine, pour tout ce qui touche les expériences de l'artillerie, les méthodes de travail et le calcul : chaque ministre se tenait au courant de ce que faisait l'autre.

Nous avons à notre disposition l'histoire de la commission de Gâvre grâce aux livres de Léon Patard [Patard 1930] [16], de Prosper J. Charbonnier [Charbonnier 1906] [17], et le petit fascicule du directeur central de l'artillerie navale Maxime Cremieux (1869-1932) [Crémieux 1930]. Le livre de Patard est un ouvrage d'environ 400 pages qui raconte l'histoire de la commission, de ses origines jusqu'à 1930, riche en détails concernant les acteurs qui ont créé et développé cette institution, l'organisation du personnel, ses activités effectuées période par période, les essais et les expérimentations dont les techniques évoluent dans le temps, et la reproduction parfois intégrale de quelques documents officiels (lettres du Ministre de la Marine, décrets etc..). Sur un autre plan, l' historique de Charbonnier fournit une histoire plus focalisée sur la balistique et ses méthodes, tout autour de ce qu'il appelle lui-même *l'esprit gâvrais*.

16. Léon Patard(1872- ?), officier de l'artillerie navale et président de la Commission de 1927 à 1930.

17. Prosper Jules Charbonnier (1862-1936) est un ingénieur général de l'artillerie navale, membre et président de la Commission de Gâvre de 1911 à 1917.

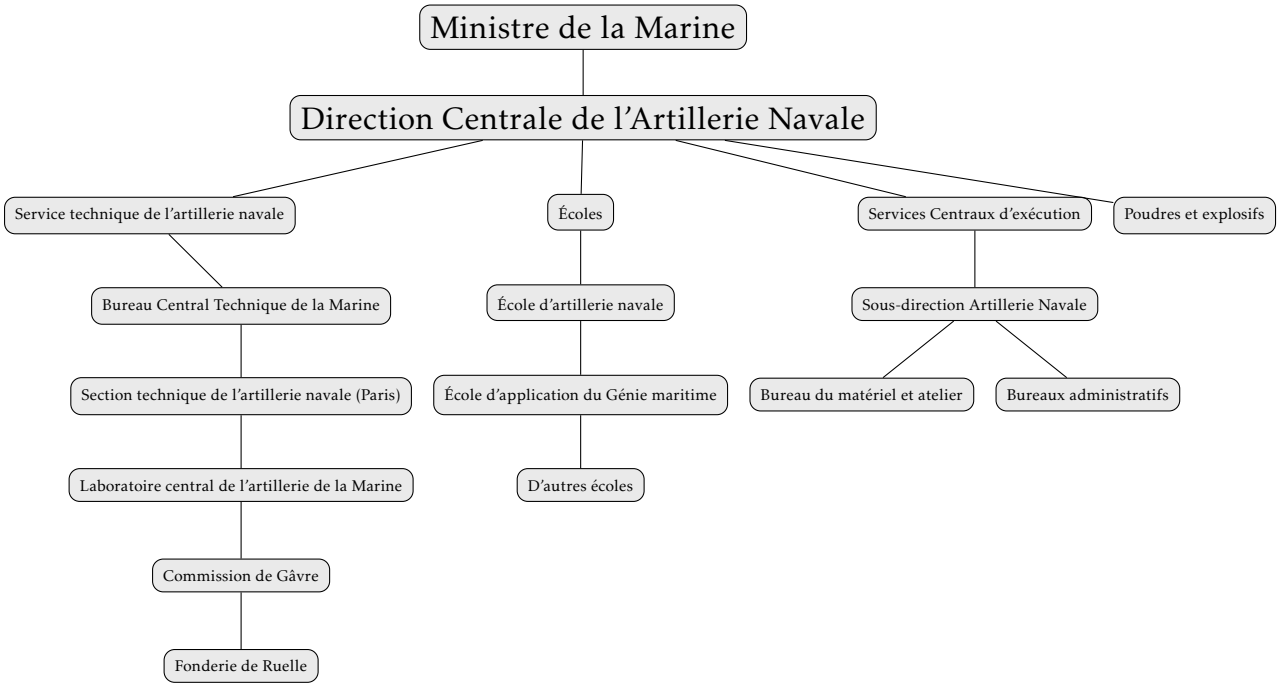


FIGURE 1.2 – Organisation de la Direction Centrale de l'Artillerie Navale 1913-1917. Le Service Technique de l'Artillerie Navale, créé en 1913, comprenait un organe de direction qui prescrivait les études et les essais (Bureau Centrale Technique) et des organes d'exécutions, à savoir la Section Technique de l'Artillerie Navale, la Commission de Gâvre, la Fonderie et le laboratoire central. Si le corps des ingénieurs de l'Artillerie Marine est né en 1829, celui de l'artillerie navale est plus récent (1909).

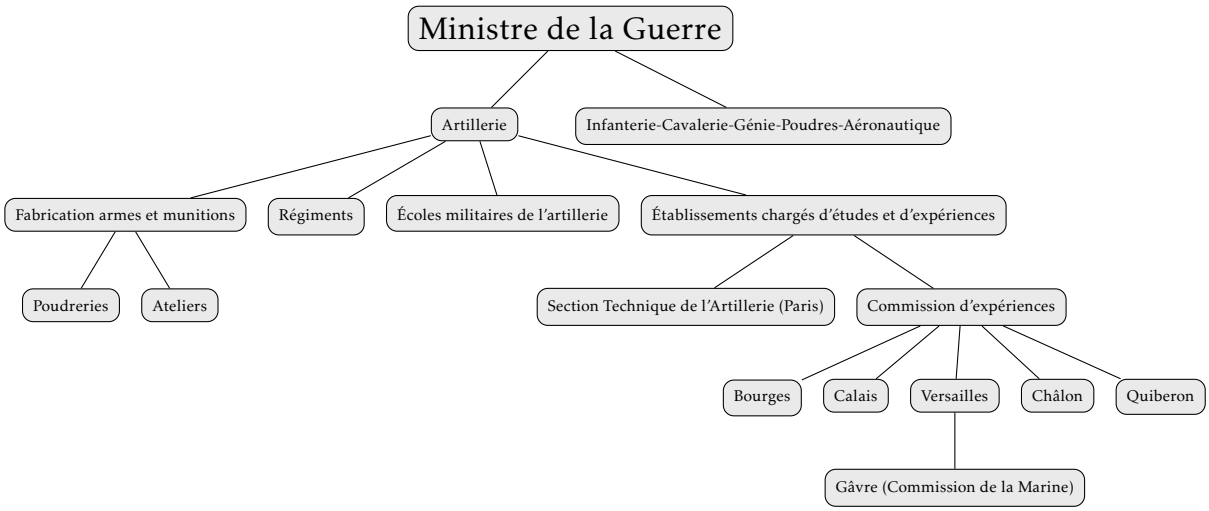


FIGURE 1.3 – La Commission de Gâvre est un établissement de la Marine mais simultanément elle fait partie de l'ensemble des Commissions d'expériences du ministre de la Guerre chargées d'effectuer les études et les essais sur demande l'armée de terre.

1.1.2 1915-1920. Les mathématiciens à Gâvre

La situation de Gâvre était critique lorsque la guerre a éclaté. En effet, son personnel avait été très fortement réduit à cause d'un décret de mobilisation du 2 août 1914 qui avait privé la commission des officiers de Marine et de l'Artillerie. La commission était donc réduite à cinq ingénieurs d'artillerie navale [figure 1.4] :

— M. Charbonnier, (président de la Commission)
— M. Vuillard
— M. Garnier
— M. Sugot
— M. Anne

FIGURE 1.4 – Les officiers militaires de Gâvre. De gauche vers la droit : M. Sugot, M. Patard, M. Causse, M. Couarde, M. Vuillard, M. Guézennec, M. Anne, M. Fanène, M. Surleau, M. Paul [Patard 1930, 273].

Durant les premiers mois, la commission se bornait à assurer les recettes de poudres et obus mais rapidement, en 1915, la situation changea et le ministre de la Guerre commença à poser des questions toujours plus complexes liées à l'arrivée de l'artillerie lourde, des aéronefs, de nouvelles armes de gros calibre et des cibles invisibles [18]. Ces nouvelles questions concernaient l'étude du tir aérien, de canons

18. A ce propos, le Général Bourgeois crée en 1914 le Groupe de Canevas de Tir qui prévoit des calculs performés pour les artilleurs chargés de tirer sur une cible invisible. Un mathématicien qui a joué un rôle fondamental dans cette commission fut André-Louis Cholesky (1875-1918), mobilisé au Groupe de Canevas de Tir de l'Armée des Vosges. Sur sa biographie scientifique voir [Brezinski et Tournès 2014].

de petit et grand calibre, de nouveaux projectiles, bombe d'aviation etc. Toujours en 1915, la France se rendit compte que les problèmes de la guerre n'étaient plus seulement une question d'artillerie mais aussi une question d'effort intellectuel et de développement de nouvelles techniques et de connaissances à son service en connexion avec la météorologie, l'optique, la cartographie, l'acoustique etc. [Aubin 2014, 327].

Avant 1914, la solution numérique du problème balistique existait dans tous les cas de la pratique de l'utilisation de l'artillerie. Les problèmes étaient autour des trois catégories : le tir tendu à grande vitesse, le tir à moyenne vitesse sous un angle inférieur à 30 degrés (tir de canons de campagne, de siège, de côte) et le tir vertical à faibles vitesses (tir des obusiers et mortiers) [19]. Au cours de la guerre, les méthodes précédemment envisagées étaient devenues impuissantes puisqu'il fallait effectuer des tirs correspondants à une portée et un angle de tir plus grands. Les nombreux calculs à cause des nouvelles questions posées par la guerre et, ajouté à cela, le manque de personnel, mettaient à dure épreuve les forces de la Commission de Gâvre. Conscient de la possibilité de surmonter ce problème à travers un renforcement intellectuel, le président de la Commission, Charbonnier, décida de demander une collaboration du personnel externe, comprenant des universitaires. Dans une lettre du 12 octobre 1915, il écrivit au Préfet maritime de Lorient en ces termes :

> "La Commission de Gâvre travaille actuellement presque exclusivement pour le département de la guerre. Les travaux d'expériences et de calcul qui lui sont confiés deviennent de jour en jour plus nombreux, et les ingénieurs de la Commission, qui, au prix d'un travail soutenu et épuisant, sont parvenus à assurer à aux seuls le service, se trouvent surmenés.
> Il est donc indispensable et urgent que l'effectif de la Commission soit sérieusement renforcé.
> A défaut d'officiers d'artillerie métropolitaine disponibles et aptes aux fonctions spéciales de la Commission, je pense qu'il serait possible de faire appel à des professeurs de l'Université mobilisée et en particulier à des professeurs de mécanique des Facultés. Leur formation intellectuelle et professionnelle les rendrait, je pense, très rapidement utilisables par la Commission pour des calculs et mêmes pour des expériences. " [Patard 1930, 270]

19. Historique des tables de tir diffusé par le Ministère de la guerre dans *Tables de balistique extérieure*, Commission A.L.V.F (1921), [SHD-Marine, série H, Archives de la Commission de Gâvre].

L'appel de Charbonnier [Figure 1.5] au personnel auxiliaire fut écouté. La preuve en est qu'outre à un certain nombre d'officiers militaires, plusieurs universitaires et personnels civils mathématiciens arrivèrent à Gâvre entre 1915 et 1918 [Table 1.1], y compris le personnel auxiliaire provenant de l'étranger, notamment les savants mis à la disposition de la Commission de Gâvre par le gouvernement américain [20].

FIGURE 1.5 – Jules Prosper Charbonnier (1862-1936).

20. Voir la réponse à l'offre de concours des savants américains du Directeur Central de l'Artillerie Navale, le 6 Août 1917 [SHD-Marine, série H, Archives de la Commission de Gâvre]. Il s'agit d'un physicien et deux mathématiciens américains. Malheureusement, les noms de savants impliqués ne sont pas repris dans ce document.

Les contributions en balistique - théoriques mais aussi expérimentales - réalisées par les mathématiciens à Gâvre sont très appréciées par le ministre de la Guerre et de la Marine, ainsi que le montre le premier témoignage officiel émanant de la Marine le 4 novembre 1917 [SHD-Marine, série H, Archives de la Commission de Gâvre] aussi bien que la deuxième le 26 Avril 1919 [21]. Leur travaux de guerre sont collectés par Charbonnier dans les trois volumes de son traité de balistique extérieure [Charbonnier 1927] [22] ainsi que dans le cours de balistique de Georges Sugot [Sugot 1918] [23].

Qui désignait les savants à mobiliser ? C'est le ministre de l'Instruction qui proposait au ministre de la Marine les universitaires les plus appropriés à leurs exigences, ainsi qu'en témoigne le cas de Châtelet :

> "Le travail demandé à la Commission de Gâvre pour l'établissement des tables pour le tir à terre ne cesse d'augmenter et l'utilisation de canons de divers modèles en vue de la lutte contre les sous-marins a, en outre, conduit à faire établir de nouvelles tables pour le canon de la flotte ; de sorte que le personnel que vous avez bien voulu mettre à ma disposition et dont j'ai apprécie le concours éclairé, n'est plus numériquement suffisant.
> J'ai par suite l'honneur de vous demander de vouloir bien me faire connaître s'il ne vous serait pas possible de détacher à Gâvres comme auxiliaires trois militaires mobilisés aptes aux travaux de la Commission.
> Pour le cas où vous voudriez bien donner satisfaction à ma demande, je vous indique ci-dessous les noms de professeurs de l'Université qui m'ont été signalés par le Ministère de l'Instruction publique comme particulièrement préparés à ces fonctions : M. Châtelet [...] " [24]

Albert Châtelet, mobilisé à Gâvre du 1 avril 1916 au 14 février 1919, était chargé d'organiser les tirs aériens et d'en interpréter les résultats obtenus. Il était intégré dans le cadre d'une mission spéciale appelée la M.T.A.G (Mission du tir aérien de Gâvre), fondée en 1916 par le Ministre de la Marine et confiée à Garnier. En 1918, elle s'évoluera en M.B.T.A (Mission de balistique de tir aérien) et aura une section à Paris pour les investigations théoriques et une section à Lorient pour

21. [Archives départementales du Pas-de-Calais, 81 J 1, Fonds Châtelet].

22. Traité qui lui vaut le prix Poncelet en 1922 (séance du 22 décembre 1922, CRAS). Cette ouvrage constitue un livre de référence pour la balistique théorique française autant que le traité de Siacci en Italie et celui de Cranz en Allemagne.

23. Prix de six milles francs recomposées par l'Académie des sciences en 1922, qui considère ce cours comme un progrès de nature à accroître de nos forces navales ".

24. Le Ministre de la Marine au Ministre de la guerre, document daté du 26 février 1916 [Archives départementales du Pas-de-Calais, 81 J 1, Fonds Châtelet].

celles expérimentales [25]. Le but de cette mission était d'effectuer toutes les études aériennes concernant les tirs (de terre et de mer) contre les aéronefs, les objectifs terrestres, marins ou aériens, les fusées et les torpilles automotrices . Il semble que Châtelet n'ait jamais éprouvé l'intérêt de publier ses travaux de balistique. Dans sa Notice, il écrit : "Je n'ai fait sur ce sujet aucune publication théorique, sauf une collaboration constante et souvent anonyme à la rédaction des procès verbaux d'expériences, notes et rapports techniques de la Commission" [26].

Un autre mathématicien et maître de conférence de la Faculté des Sciences de Lille mobilisé à Gâvre est Jean Chazy. Il prit son service à la M.B.T.A en octobre 1918 après avoir été envoyé au laboratoire de reconnaissance sonore mis en place à l'École Normale Supérieure et dirigé par le physicien Jacques Duclaux. Dans ce cadre, Chazy a pu calculer la position des fusils Big Bertha des allemands tirant à Paris de longue portée avec une précision surprenante [27]. Toujours dans la M.B.T.A, Jules Haag, étudiait et perfectionnait des méthodes de calcul du tir aérien. Ce mathématicien était l'un des acteurs principaux du renouvellement profond des procédés numériques de calcul des trajectoires et de ses perturbations ; il appliqua le calcul des probabilités à la détermination des ellipses des éclatements des projectiles fusants. [28]. Un professeur de mathématique du Lycée de Nancy, Sauvigny [29], l'adjoint de Anne, s'occupait de remettre en état les communications téléphoniques et télégraphiques du Polygone de Gâvre. Joseph Kampé de Fériet, stagiaire à l'Observatoire de Paris au moment de sa mobilisation, était adjoint à l'officier Sugot. Ernest Esclangon, assurait les études sur le repérage par le son, les ondes balistiques et de détonation, et sur la cinématographie des phénomènes gazeux, en réalisant également un appareil pour détecter les ondes [30]. Sur un plan plus théorique, Arnaud Denjoy avait apporté une contribution importante à l'intégration de l'hodographe.

25. Pour plus de détails sur la M.B.T.A voir [Patard 1930, 274] et [Aubin 2014].

26. Notice sur les titres et les travaux de Châtelet, 25 novembre 1923 [Archives départementales du Pas-de-Calais, 81 J 1, Fonds Châtelet].

27. Jean Chazy (1882-1955) fut un mathématicien et astronome spécialiste dans le problème de trois corps. Il assura des cours de mécanique générale à la Faculté des Sciences de Lille depuis 1911 et son poste sera confié à Kampé de Fériet en 1920. Il sera professeur de mécanique rationnelle à la Sorbonne à partir de 1934 et il sera le patron de l'astronomie et de la mécanique céleste en France après la guerre. Sur Chazy voir http ://www-history.mcs.st-andrews.ac.uk/Biographies/Chazy.html.

28. Pour la contribution de Haag à Gâvre voir [Aubin 2014].

29. Sur la base de données Leonore, il y a un dossier d'un professeur de mathématique du Lycée Charlemagne de Paris, Lucien Sauvigny (1881-1966). Il est possible que ce dossier corresponde à celui du professeur Sauvigny mobilisé à Gâvre.

30. L'intérêt pour ce domaine remonte à la fin de 1914. Sur Esclangon et sa contribution au domaine du repérage par le son voir [Schiavon 2014, 474-484].

Outre les mathématiciens, il y avait aussi des physiciens comme Gabriel Foex qui était engagé dans le réglage et la manipulation de plusieurs appareils, en aidant la Commission dans les questions de physique ; en dehors du milieu purement scientifique, on trouve un actuaire du Ministère du Travail, Ferdinand-Dreyfus, chargé de la constitution de l'outillage numérique à la Commission de Gâvre. Dans la prochaine section, l'attention sera focalisée sur quelques exemples de la manière dont les mathématiciens ont appliqué leurs recherches pour résoudre certaines questions de la balistique théorique. Cependant, avant de détailler les exemples, il faudra donner quelques éléments introductifs sur cette mathématisation de la balistique et sur son utilité dans le milieu militaire.

	Titres	Fonctions
Albert Châtelet	Maître de conférence à la Faculté des Sciences de Lille.	Tirs en sous-ordre ; rédaction procès verbaux et calculs.
Jean Chazy	Maître de conférence de la Faculté des Sciences de Lille.	Tirs aériens.
Arnaud Denjoy	Maitre de conférences à l'université de Montpellier.	Service général.
Ernest Esclangon	Professeur à la Faculté des Sciences de Bordeaux.	Acoustique de canons et projectiles.
Gabriel Foex	Professeur agrégé de physique à Zurich.	Appareils pour la mesure des vitesses d'un projectile.
Jules Haag	Maître de conférence à l'université de Clermont Ferrand.	Nouvelles méthodes de calcul de trajectoires.
J. Kampé de Fériet	Astronome adjoint à l'Observatoire de Paris.	Tirs en sous-ordre ; rédaction procès verbaux et calculs.
Osée Marcus	Professeur de mathématiques (travaillant pour la Marine française)	Calculs et expériences.
Georges Valiron	Professeur de mathématiques spéciales au lycée de Lyon.	Calculs et expériences.
M .Sauvigny	Professeur agrégé de mathématiques à Nancy.	Communications téléphoniques et télégraphiques.
M. Pellissier	Élève de l'École Normale Supérieure.	Calculateur.
M . Ferdinand-Dreyfus	Actuaire au ministère du Travail.	Confection des tables de tir, outillage numérique.
M. Caignon	Professeur agrégé de mathématiques au Lycée de Lille.	Tirs aériens, calcul des trajectoires et coefficients différentiels.
M . Delcourt	Élève à l'École Normale Supérieure.	Tir aériens (avant : Mission Chilowsky).
M. Dodier	Professeur agrégé de mathématiques au Lycée de Nantes.	Tirs aériens, calcul des trajectoires et coefficients différentiels. Calculateur.
M. Fort	Professeur agrégé de mathématiques au Lycée de Neuilly.	Tirs aériens, observation visuelle et photographique des éclatements.
M. Janet	Professeur agrégé de mathématiques au Lycée de Nancy	Dépouillement et rédaction de résultats expérimentaux.
M. Muxart	Professeur agrégé de mathématiques au Lycée Montaigne à Paris	Interprétation des tirs aériens et établissement d'abaques pour matériels anti-aéronefs.
M. Pouget	Professeur agrégé de mathématiques au Lycée de Montpellier	Interprétation des tirs aériens et établissement d'abaques pour matériels anti-aéronefs.
Louis Fort	Professeur de mathématiques au lycée de Neuilly.	Tirs aériens.
M. Rigollet	Professeur agrégé de mathématiques au Lycée Saint Louis	Calculs de trajectoires et de coefficients différentiels.

Tableau 1.1 – Mobilisation des universitaires et des professeurs agrégés de mathématiques à la Commission de Gâvre entre 1915 et 1918. Rapport au ministre de la Marine sur le renseignements sur les services et historique de la Commission, 26 avril 1919 [Archives départementales du Pas-de-Calais, 81 J 1, Fonds Châtelet].

1.2 La mathématisation de la balistique. Jusqu'à quel point est-elle "utile" ?

La contribution des mathématiciens touchait plusieurs niveaux - éducation, politique et affaires militaires - [Aubin et Goldstein 2014b, 132] et concernait diverses disciplines de la guerre notamment l'aérodynamique, la balistique, l'acoustique, la cryptologie et le repérage par le son. Martina Schiavon décrit dans sa thèse le rôle joué par la collaboration entre savants (surtout les physiciens) et militaires dans le domaine du repérage par le son, dont les contacts sont assurés par Paul Painlevé et les techniques sont en connexion avec l'histoire du Service Géographique de l'armée. En 1914, l'acoustique devient un nouveau centre d'intérêt chez les scientifiques (notamment les physiciens) et les militaires. En effet, à cause de l'introduction des canons à longue portée, les batteries des ennemies n'étaient plus visibles depuis le champ d'attaque. Il est devenu par conséquent nécessaire de créer des systèmes capables de localiser l'ennemi en l'écoutant, en le localisant via le bruit du départ des projectiles [Schiavon 2014, 426]. Dans ce contexte, les physiciens et les militaires donneront naissance à plusieurs systèmes de repérage du son : le système Cotton-Weiss pour le repérage à petite base acoustique et les systèmes Dufour, Bull-Weiss et Driencourt-Ferrié à grande base acoustique [Schiavon 2014, chap. 6]. Enfin, sa thèse rend possible une comparaison entre les mathématiciens et les physiciens mobilisés ; pour les seconds, "les officiers ne font qu'assimiler un contact qui préexistait déjà et adapter des techniques aux nécessités (et à la situation) de la guerre " [Schiavon 2014, 15]. Quant aux mathématiciens, on est loin d'affirmer qu'il s'agit d'une collaboration bien consolidée avant la guerre. Le général Houssette, qui présidera la commission de Gâvre de 1917 à 1919, souligne les avantages de " cette collaboration pendant les hostilités, qui antérieurement s'ignorait presque complètement et qui a permis aux uns et aux autres de s'apprécier mutuellement, et de réaliser une union féconde de bonne volonté en vue de l'intérêt général " [31].

En ce qui concerne les disciplines de la guerre, elles ont subi, comme les autres appartenant domaine de l'ingénierie, une première mathématisation lors de la première révolution industrielle (1815-1850 en France) [32]. La réalisation des travaux publics (canaux, routes et ponts) et la construction des bâtiments avaient alors mené les ingénieurs à effectuer un grand nombre de calculs et à créer des méthodes mathématiques pour résoudre les nouveaux problèmes posés par la

31. Note pour le Service Technique, le 13 Févier 1919, [Archives départementales du Pas-de-Calais, 81 J 1, Fonds Châtelet].

32. Sur la communauté des ingénieurs français pendant la première révolution industrielle voir [Chalvet 1931] et [Wendling 1938].

révolution. En reprenant les mots de Dominique Tournès, cette révolution avait donné une nouvelle identité aux ingénieurs, en incrémentant la mathématisation des sciences de l'ingénierie et le travail en équipe :

> "In this context, the engineer is faced with ever more numerous calculations, longer and more complex, requiring an increasing mathematization as well as a collective work organization more effective. This leads him to create by himself mathematical tools adapted to the new problems and the new implementation constraints that face him". [Tournès 2012, 383]

De plus, dans la France du XIX^e siècle, il existait des tensions entre mathématiciens et ingénieurs à cause de leur solide formation théorique. Pourtant, les exigences des mathématiciens étaient différentes de celles des ingénieurs, ce qui a obligé ces derniers à créer d'autres outils mathématiques plus simples et pratiques. Parmi ces disciplines, la balistique a sans aucun doute subi une première mathématisation de la part des officiers militaires déjà à partir du XIX^e siècle, d'autant plus qu'en 1914, elle était une science pratique bien établie, enseignée dans les académies militaires avec ses propres livres et sa propre tradition. A cette époque elle constituait une branche autonome de la science militaire, totalement étrangère aux mathématiciens civils [Aubin et Goldstein 2014a, 40]. C'est seulement à cause de la mobilisation du conflit 1914-1918 que ce domaine devient complètement accessible aux mathématiciens : c'est le début d'une deuxième mathématisation.

Dans la section qui suit nous montrerons dans quelle mesure cette mathématisation a donné une amélioration des outils balistiques des ingénieurs dans le calcul des tables de tir. Plus en général, elle permet de réfléchir sur l'impact des mathématiciens sur les institutions militaires, et sur le fait que l'une des conséquences soit une mathématisation des disciplines de la guerre. A ce propos, nous allons envisager le problème principal de la balistique et les méthodes analytiques et numériques réalisées par Jules Drach, Arnaud Denjoy, Kampé de Fériet et Jules Haag. Si la théorie de Galois et celle des fonctions analytiques utilisées respectivement par Drach et Denjoy fournissent des méthodes peu accessibles aux officiers militaires, les applications de la théorie des fonctions hypergéometriques de Kampé de Fériet, ainsi que ses connaissances de mécanique céleste, donneront naissance à des solutions plus accessibles au calcul des tables de tir. Il en va de même pour Jules Haag et sa théorie des erreurs.

1.3 Le problème principal de la balistique

La balistique, la science qui étude le mouvement du projectile, est une discipline fondée sur les connexions entre les aspects théoriques, expérimentaux et

de calcul. Il y a deux types de balistique : intérieure et extérieure. La première étudie tout ce qui se passe dans la bouche du canon et a besoin de connaissances provenant de la thermodynamique et la chimie ; la deuxième étudie la trajectoire d'un projectile dans l'air, dont les propriétés mécaniques impliquent des problèmes mathématiques, mécaniques et physiques. A son tour la balistique extérieure est divisée entre le problème de balistique principal et le problème de balistique secondaire [Figure 1.6]. Le premier problème étudie une trajectoire d'un projectile qui est altérée uniquement par des petites perturbations. Dans ce cas, le projectile est représenté par un point matériel soumis aux seules forces de la résistance de l'air et la pesanteur. Quant au problème secondaire, il prend en compte l'évaluation des grandes perturbations provenant des effets du vent, des caractéristiques du projectile, du mouvement et de la forme de la terre et de la densité de l'air.

Dans le détail, le problème principal est décrit par quatre équations :

$$\frac{d(v\cos\tau)}{d\tau} = \frac{c}{g}vF(v) \qquad dx = -\frac{v^2}{g}d\tau$$

$$dt = -\frac{v}{g}\frac{d\tau}{\cos\tau} \qquad dy = -\frac{v^2}{g}\tan\tau d\tau$$

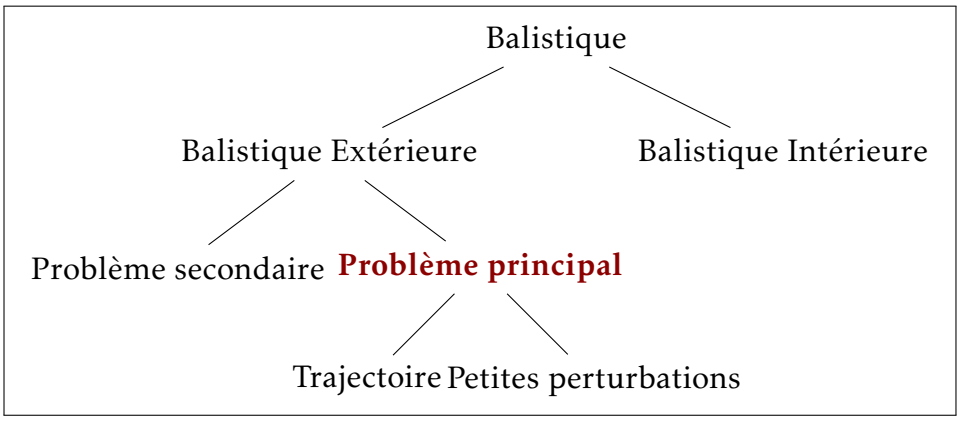


FIGURE 1.6 – Problème principal de la balistique.

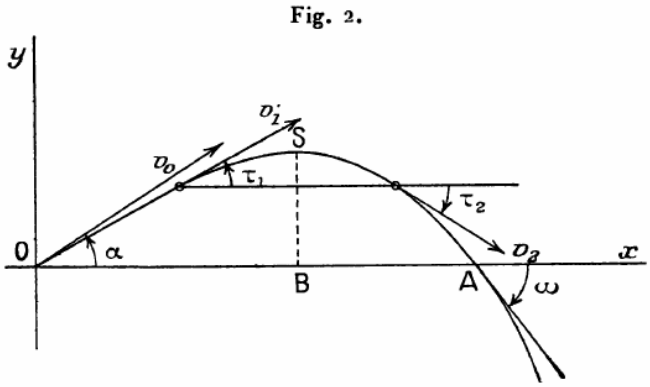


FIGURE 1.7 – La trajectoire décrite par le problème balistique principal [D'Adhémar 1934, 7].

S = Sommet
w = angle de chute
v = vitesse du centre de gravité
$\alpha = \tau_0$ angle de projection
τ = angle d'inclination entre l'horizontale et la tangente d'un point de la trajectoire
c = coefficient balistique (dimension du projectile)
$F(v)$ = résistance de l'air
i = Indice de forme (forme projectile)
$u = v\cos\tau$ composante horizontale
$n = \dfrac{F'(v)}{F(v)}$ degré de la résistance

Le point qui décrit la trajectoire du projectile est repéré par x, t, y, l'angle d'inclination τ et la vitesse v. Le coefficient balistique c, l'angle de projection α et la vitesse horizontale u_0 constituent les élément principaux de la trajectoire [Figure 1.7].

La première équation est l'équation dite hodographe de la balistique dont la propriété est d'être fonction uniquement de deux variables, v et τ. Étant données les conditions initiales de v et τ, l'intégration de l'hodographe permet de connaître les trois équations, de résoudre complètement le problème balistique principal, et donc de déterminer la trajectoire d'un projectile. Si nous supposons savoir intégrer l'hodographe, nous pouvons exprimer v en fonction de τ et remplacer cette fonction $v = \psi(\tau)$ dans les trois équations : la question est alors ramenée à de simples intégrations (intégration à variables séparables si elles sont du premier

ordre) :

$$v = \psi(\tau) \qquad x = -\int_{\alpha}^{\tau} \frac{\psi(\tau)2}{g} d\tau$$

$$t = \int_{\alpha}^{\tau} -\frac{\psi(\tau)}{g} \frac{d\tau}{\cos\tau} \qquad y = -\int_{\alpha}^{\tau} \frac{\psi(\tau)^2}{g} \tan\tau d\tau$$

Le problème balistique est complet si l'intégration de l'hodographe est possible. Or, il y a plusieurs méthodes pour calculer l'hodographe : numériques, graphiques et analytiques.

La résolution graphique du problème de la trajectoire était un domaine qui concernait surtout les hommes d'artillerie et ne requérait pas de grandes connaissances de mathématiques avancées. Les études concernaient des dispositifs et des techniques spécifiques pour réaliser des tables graphiques, à savoir les intégraphes et les intégromètres à lame coupante des Colonels Filloux et Louis-Fréderic Jacob [33], les méthodes graphiques de Hyppolite Parodi [34] ou d'autres procédés comme la nomographie de Maurice d'Ocagne [35].

1.3.1 Les méthodes numériques dans les tables de tir

Quant aux méthodes numériques, elles donnent une solution approchée de l'hodographe, en calculant numériquement les éléments de la trajectoire afin d'établir les tables de tir. A la base, il y a une altération de l'hodographe (tir de plein fouet, faible angle de tir) ou une altération de la fonction de la résistance de l'air (tir courbe, faible vitesse) ou encore le fractionnement de la trajectoire en petits arcs (méthodes par arcs successifs, trajectoire quelconque).

Comme mentionné précédemment, le ministre de la Guerre demandait des portées toujours plus grandes et cela menait à envisager de nouvelles données

33. Louis Jean François Filloux (1869-1957) fut un colonel d'artillerie de l'École d'application de l'artillerie et du génie. Jacob, fut un ingénieur de l'artillerie navale et directeur du Laboratoire central de la Marine à Paris ; sur ses appareils d'intégration graphique voir [Tournès 2003–11].

34. Le commandant Hyppolite Parodi (1874-1968), ingénieur en Chef du Service Électrique du Matériel et de la traction, fut Directeur de la Section de balistique et des tables de tir de la Section Technique de l'artillerie à Paris pendant le conflit. Ses travaux de balistique et plus tard ceux sur les systèmes d'électrification ferroviaire français sont très appréciés chez les académiciens, à tel point qu'il sera élu membre de l'Académie des Science en 1949.

35. Sur la nomographie et Maurice d'Ocagne voir [Tournès 2011] ; sur un discours plus général sur l'intégration graphique des équations différentielles linéaires ainsi que sur les tables graphiques, ses instruments pour le calculer et leur place dans l'histoire des mathématiques voir le même auteur dans [Tournès 2003], [Tournès 2007], [Tournès 2003–11].

pour la création des nouvelles tables de tir. Pour faire leurs calculs, les membres de la Commission de Gâvre se servaient de machines à calcul élémentaires, règles à calcul et tables numériques ; ils n'avaient pas à disposition des appareils sophistiqués de calcul mathématiques, et cette rareté des moyens de calcul peut être expliquée par le fait que les officiers avaient d'amples connaissances en mathématiques pures et préféraient utiliser des méthodes plus élégantes provenant de la Géométrie et de l'Analyse plutôt que du calcul numérique. [36] De plus, il faut ajouter encore que les mêmes techniques du conflit du 1914 ont été employées même pendant la seconde guerre mondiale [Mounier-Kuhn 2010, 197]. Avant la première guerre les tables de tir étaient calculées par la méthode de tir de plein fouet et le tir courbe. La méthode de tir de plein fouet (méthode de Siacci) s'appliquait dans les trajectoires à faibles valeurs de l'angle de tir. Elle consiste dans le remplacement, dans un certain intervalle de vitesse, de la quantité $\cos\alpha$ de l'hodographe par une constante. Cette altération de la vitesse donnera lieu à une équation de l'hodographe approchée et à 4 fonctions J, D, S, A. Les tables des quatre intégrales dressées permettront ensuite de calculer la trajectoire. Concernant la méthode à tir courbe, elle était une bonne technique pour les trajectoires à faibles vitesses, qui se fondait sur la recherche d'une loi de la résistance de l'air entre les limites des vitesses envisagées, qui puisse être en même temps proche de la loi réelle.

La méthode de tir de plein fouet produisait des tables pour des angles inférieurs à 20 degrés alors que pour l'artillerie lourde il fallait disposer de tables de tir jusqu'à 40 degrés. Une solution fut proposée par l'officier Sugot en 1916, qui réalise une méthode dite des vitesses fictives. Il considère le rapport de la vitesse initiale réelle du projectile à la vitesse fictive dont cette dernière est la vitesse initiale qui, sous le même angle α, donne dans le vide la même portée X de la vitesse réelle. Grâce à l'introduction de cette trajectoire fictive (qui n'est qu'une parabole du vide correspondant) il dresse des tables pour toutes les trajectoires à trois paramètres (α, u_0, c) contenant les éléments du point de chute, du sommet, les coefficients différentiels pour (α, u_0, c), la vitesse du vent, du tireur etc. [Sugot 1928, 827-920]. Cependant, il restait encore la question des tirs de canons contre les avions dont les tables calculées avaient besoin d'angles de tir atteignant 90 degrés ! Il faillait trouver des nouvelles méthodes qui nécessitaient des nouvelles compétences mathématiques. Ce problème sera résolu par Jules Haag, lequel, en collaboration avec le professeur Marcus et l'officier militaire Garnier, reprendra à la main l'ancienne méthode par arcs successifs de Gâvre. Il s'agit d'une méthode par arcs successifs créée en 1887 par un membre de la commission, le Capitain Gossot. La trajectoire est fractionnée en petits arcs définis par les angles d'inclination τ_1, τ_2

36. Sur les bureaux de calcul dans les centres militaires comme Gâvre voir [Mounier-Kuhn 2010].

aux extrémités en supposant que la loi expérimentale $F(v)$ est découpée en zones de représentation bv^2 où b est constant sur tout l'arc mais varie de l'un à l'autre. Sous ses conditions, l'hodographe permettra de calculer les éléments (x_1, y_1, t_1) de la deuxième extrémité de l'arc à partir de la première (x_0, y_0, t_0) et ainsi de suite de façon itérative, jusqu'à ce qu'on arrive à une ordonné nulle. En 1915, Haag à l'aide de la théorie des erreurs, perfectionnera cette méthode en donnant lieu à un système de calcul des trajectoires efficace pour tous les angles de tir : la méthode G.H.M [Haag 1921] et [Aubin 2014]. En effet, les calculs de la méthode de Gâvre introduisaient deux types d'erreur : l'erreur balistique et géométrique. La première se produit en imposant b constante, ce qui mène à des répercussions sur la vitesse v_1 du premier arc et, par conséquence, sur les vitesses des autres arcs ; la deuxième dépend de formules d'approximation pour calculer les coordonnées x_i, y_i, t_i de l'extrémité de chaque arc. Dans ce contexte, Haag donna une solution qui permet de calculer le premier terme de l'erreur par un développement en série et ensuite de le corriger, en fixant les fractions du rayon de convergence à choisir, afin que l'erreur commise soit inférieure à une limite donnée.

1.3.2 Les méthodes analytiques dans le cas d'une fonction quelconque de la résistance de l'air

Les méthodes analytiques conduisent à une solution exacte du problème principal de la balistique. Elles permettent aux balisticiens et aux mathématiciens d'envisager le problème de l'intégration de l'hodographe dans le cas où :

- $F(v)$ est une fonction quelconque
- $F(v)$ est une fonction sous la forme $F(v) = B_n v^n$ dans le cadre de ce qu'on appelle la *théorie d'Euler*, où la résistance de l'air revêt une forme plus facile à traiter pour la recherche d'une solution rigoureuse. Elle s'adapte très bien à la méthode des arcs successifs.

En général, l'intégration pour $F(v)$ quelconque est impossible. Par contre, nous pouvons nous demander pour quelles formes de la fonction $F(v)$ cette intégration est possible. Dans ce cas l'expression analytique ou les valeurs numériques de $F(v)$ sont négligées ainsi que son accord avec la loi expérimentale de la résistance de l'air du problème balistique réel. Les premières tentatives visant à déterminer ces formes de résistance se trouvent dans le *Traité de l'équilibre et du mouvement des fluides* (1744) de d'Alembert ([D'Alembert 1744]) qui trouva quatre fonctions particulières $\rho = \dfrac{cF(v)}{g}$ capables de rendre intégrable l'hodographe. En 1901 Siacci reprendra ce problème [Siacci 1901]. Dans sa note, il multiplie l'hodographe par un facteur intégrant M dépendant de v et τ :

$$M = e^{\eta}(v\cos\tau)^{-n} \quad \text{où} \quad \eta(v,\tau) \tag{1.3}$$

et il montre que M est un facteur intégrant pour l'hodographe intégrable si la fonction de la résistance de l'air vérifie certaines conditions. Il utilise le même raisonnement avec d'autres types de facteurs intégrants jusqu'à obtenir une douzaine de relations entre $F(v)$ et v, qui rendent l'équation de l'hodographe intégrable. Cependant, les fonctions trouvées sont encore des cas particuliers, étant donné que les facteurs intégrants choisis ont des formes particulières.

Le cas le plus général sera donné par Jules Drach en 1914 [Drach 1914] et repris plus tard en 1917, pendant sa mobilisation à Paris, dans la section de mécanique de la commission des inventions [37]. A Gâvre, un autres mathématicien Arnaud Denjoy, spécialiste de la théorie des fonctions de variable réelle et complexe, développe les idées de Drach à l'aide de la théorie des fonctions analytiques. Pour toutes ces raisons, afin de comprendre le travail de Denjoy, il faudra s'attarder sur celui de Drach [Drach 1914].

Jules Drach. Une intégration de l'hodographe à l'aide de la théorie de Galois

Jules Drach constitue un exemple clé illustrant le phénomène de mathématisation de la balistique de la première guerre mondiale : il définit tous les cas où l'équation balistique est intégrable à l'aide de la théorie de Galois. Son travail sur l'intégration de l'hodographe est une application de sa théorie des équations différentielles d'ordre n, appelée *théorie de la rationalité* [38]. Son but est de "créer une méthode permettant de classer, d'une manière nécessaire et naturelle, les transcendantes qui sont les solutions générales des équations différentielles. Cette méthode donne la solution du problème logique de l'intégration, pour ces équations, quand le domaine de rationalité auquel appartiennent les éléments qui figurent dans l'équation a été convenablement fixé " [Villat 1931, 212]. En d'autres termes, il trouva une méthode pour réduire une équation différentielle d'ordre n à un système de n intégrales, obtenu par un groupe de transformations et par les invariants qui font partie d'un certain domaine de rationalité. Dans ce cadre, il généralisa, au cas d'une équation différentielle d'ordre n à une variable indépendante, les idées de Picard sur l'extension de la théorie de Galois concernant les équations algébriques aux équations différentielles du premier ordre et homogène. En effet, Picard [Picard 1887] avait édifié sa théorie sur les analogies entre les équations différentielles linéaires et les équations algébriques. Il mettait en relation la théorie des groupes de transformation et ses propriétés générales liées

37. *Sur l'équation différentielle de la balistique extérieure et son intégration par quadrature*, note envoyée à la commission balistique de l'Académie des Sciences le 5 mars 1917. Publiée après la guerre dans les Annales de l'École Normale Supérieure [Drach 1920].

38. Pour des détails sur la théorie de la rationalité voir sa thèse *Essai sur une théorie générale de l'intégration et sur le classification des transcendantes*(1898) sous la direction de Jules Tannery.

à la théorie de Lie avec les équations différentielles linéaires, de la même manière que la théorie de Galois était liée aux équations algébriques. Picard et Drach firent une recherche a priori et non pas a posteriori : au lieu de résoudre les équations de manière complète en essayant d'utiliser tout ce qu'ils connaissaient, ils trouvaient des conditions que devait satisfaire l'équation pour être intégrée. C'est l'esprit de Galois, qui adoptait le même raisonnement dans les cas d'équations algébriques.

Dans sa note, Drach reprend ce type de recherches dans le cas d'une équation différentielle dépendant de fonctions arbitraires

$$\frac{d\mu}{dw} = A(w,\mu) = \frac{\alpha(\mu)}{\beta(\mu)}$$

où $\alpha(\mu)$ et $\beta(\mu)$ sont des polynômes en μ dont les coefficients sont arbitraires en w. Son but est de réaliser une méthode pour réduire cette équation à sa forme canonique par des transformations du groupe infini

$$y + \frac{a\mu_1 + b}{c\mu_1 + d}, w = f(w_1) \text{ où } a,b,c,d,f \text{ sont des fonctions arbitraires en } w_1$$

En d'autres termes, il crée une méthode qui lui permet de déduire tous les cas de réduction de l'équation, à savoir tous le cas où l'équation est intégrable par quadrature, c'est à dire par primitivation (en utilisant des fonctions usuelles simples comme les fonctions algébriques, exponentielles et logarithmiques).

D'après un théorème démontré en 1908 [Drach 1908], les seuls cas de réduction de l'équation à sa forme canonique sont ceux où pour l'équation aux dérivées partielles correspondant :

$$\frac{d\mu}{dw} = A(w,\mu) \Leftrightarrow \frac{\partial z}{\partial w} + A\frac{\partial z}{\partial \mu} = 0$$

l'un des invariants défini par :

$$K = \left(\frac{\partial z}{\partial \mu}\right)^n \qquad J = \frac{\frac{\partial^2 z}{\partial \mu^2}}{\frac{\partial z}{\partial \mu}} \qquad z$$

peut s'exprimer comme le rapport entre deux polynômes en μ. Les éléments de la solution (le système des intégrales) de l'équation différentielle sont des transcendantes définies par des transformations de groupe linéaires et par les invariants

qui sont supposés rationnels.

Ensuite, il montre quelques applications, entre autres pour l'hodographe concernant la balistique, cas qu'il approfondira plus tard [Drach 1920]. Plus précisément, sous certaines conditions, l'hodographe est une équation différentielle linéaire dépendant de fonctions arbitraires :

$$\boxed{\frac{d\mu}{dv} = \frac{1-\mu^2}{v}(\mu+\rho) \Leftrightarrow \frac{\partial z}{\partial v} + A\frac{\partial z}{\partial \mu} = 0} \tag{1.5}$$

Si $w = v, \mu = \sin\tau$ et $\rho = \dfrac{cF(v)}{g}$ alors $A(v,\mu) = \dfrac{1-\mu^2}{v(\mu+\rho)}$. Ici retrouver tous les cas de réduction est équivalent au fait de retrouver toutes les formes de la résistance de l'air ρ qui peuvent intégrer l'hodographe avec facilité.

Sur la base des résultats établis dans [Drach 1914], il construit sa méthode en imposant que z ou K ou J soit rationnelle en μ :

$$z = \frac{f(\mu)}{g(\mu)} = \sigma\frac{(\mu-a_1)...(\mu-a_k)}{(\mu-b_1)...(\mu-b_k)}$$

$$K = \frac{f(\mu)}{g(\mu)} = \sigma\frac{(\mu-a_1)^{\alpha_1}...(\mu-a_m)^{\alpha_m}}{(\mu-b_1)^{\beta_1}...(\mu-b_n)^{\beta_n}}$$

$$J = \frac{f(\mu)}{g(\mu)} = \frac{1}{\mu+\rho} + \frac{\sigma}{\mu-1} + \frac{\lambda}{\mu+1} + \frac{\alpha}{\mu-a'} + ... + L$$

En faisant diverses transformations linéaires, il trouve un nombre de conditions (un système d'intégrales) égal au nombre des fonctions inconnues ($a_i, b_i, \rho, \sigma, \lambda$ etc.) qui rendent explicite l'expression de l'intégrale z :

$$z = \frac{f(\mu)}{g(\mu)} = \sigma\frac{(\mu-a_1)...(\mu-a_k)}{(\mu-b_1)...(\mu-b_k)} \tag{1.6}$$

$$z = \int_{\mu_0}^{\mu} \sigma\frac{(\mu-a_1)^{\alpha_1}...(\mu-a_m)^{\alpha_m}}{(\mu-b_1)^{\beta_1}...(\mu-b_n)^{\beta_n}}d\mu + \Theta(v) \tag{1.7}$$

$$z = \int_{\mu_0}^{\mu} (\mu+\rho)(\mu-1)^{\sigma}(\mu+1)^{\lambda}(\mu-a')^{\alpha}...e^{R(\mu)}\,d\mu + \Psi(v) \tag{1.8}$$

et de toutes les formes de la résistance de l'air ρ qui peuvent intégrer l'hodographe par quadrature.

Enfin, dans la deuxième partie de [Drach 1920], il montre que sa méthode permet de retrouver les formes de ρ obtenues par d'Alembert et Siacci.

Arnaud Denjoy. Un développement différent de la méthode de Drach

Drach et Denjoy développèrent la note de 1914 en prenant deux directions différentes. Concernant Drach, son travail de 1917 visait à exploiter sa méthode de 1914 pour la balistique, en montrant de manière plus explicite et approfondie tous les cas de réduction de l'hodographe, selon que z ou K ou J soit rationnelle en μ. Sur un autre plan, la note de Denjoy envoyée à la Commission balistique de l'Académie des Sciences, *Sur l'équation de la balistique extérieure* [39] était plus focalisée sur un perfectionnement de la théorie de Drach de 1914 à l'aide de la théorie des fonctions analytiques. Par ailleurs, les deux mathématiciens étaient en contact avant de publier leurs notes. Dans la lettre accompagnant sa note adressée à la Commission balistique de l'Académie des Sciences, Denjoy écrivit :

> "Ainsi que je le dit dans ma Note, c'est aux résultats publiées par M. Drach aux Comptes Rendus en 1914, que je dois toutes les idées dont j'ai usé dans mon modeste travail sur l'équation de la balistique extérieure. Il me paraît donc parfaitement juste, si M. Drach désire détailler la théorie condensée dans sa première publication, de lui laisser la priorité de le faire. [...] Si M. Drach a, comme je l'y invitais, pris connaissance de ma Note de janvier, et si, par hasard, il y a remarqué certaines considérations dont l'intérêt lui avait échappé, je me lie à sa loyauté pour me laisser le privilège de les publier sous mon nom." [Denjoy à Paul Appell , le 15 février 1917]

Et, toujours dans le même esprit, il conclut sa lettre en montrant la direction que son travail prendra dans le développement de la méthode de Drach :

> " Si M. Drach veut bien rédiger promptement une Note, je serais heureux, si elle laisse place à une communication de ma part, de publier à mon tour sur le même sujet. Je me suis toujours intéressé aux fonctions analytiques. C'est même pour pouvoir étudier leurs singularités sur des lignes -où elles ne sont plus que des fonctions d'une variable réelle jouissant en toute vraisemblance de propriétés différentielles notables-, que je me suis engagé dans l'étude de la dérivation des fonctions réelles."

39. [Académie des Sciences, dossier de balistique, Commission nommée pour l'étude des questions intéressant la défense nationale]

Une note sommaire de ses recherches sur l'intégration de l'hodographe est reproduite également par Charbonnier dans son traité de balistique extérieure [Charbonnier 1927, 497]. Après avoir rappelé les points principaux de la méthode de Drach, il considère les trois intégrales z ((1.6), (1.7), (1.8)) respectivement sous la forme suivante :

$$z = \Delta_1(v)(\mu - a_1)^{\alpha_1} ... (\mu - a_n)^{\alpha_n}$$

$$z = \Delta_2(v) \int_{\mu_0}^{\mu} (\mu - a_1)^{\alpha_1} ... (\mu - a_n)^{\alpha_n} \, d\mu + \Theta_1(v)$$

$$z = \Delta_3(v) \int_{\mu_0}^{\mu} (\mu - a_1)^{\alpha_1} ... (\mu - a_n)^{\alpha_n} e^{R(\mu)} \, d\mu \; + \Theta_2(v)$$

A partir de ces équations, il fait plusieurs considérations, en inscrivant la théorie de Drach dans le champ complexe. Il prend z en tant que fonction analytique de $\mu \in \mathbb{C}$ et v comme un paramètre réel. Ensuite il définit les points réguliers et singuliers pour z. Étant donnée a une fonction quelconque de v, $\mu = a$ est un point régulier pour z si z est développable en série de puissances positives de $(\mu - a)$ dans un cercle $|\mu - a| < r$ de rayon r. Les fonctions singulières $m(v)$ seront alors les fonctions qui ne sont pas régulières. Si $z(\mu, v)$ est l'intégrale de (1.5), toutes les singularités $\mu = m(v)$ de z sont des intégrales pour l'hodographe. D'après les propriétés des fonctions analytiques et de l'analyse complexe, il établit six conditions, lesquelles, appliquées à chacun des trois types l'expression de z permettent une solution totale et relativement simple du problème de l'intégration de l'hodographe, ainsi que la détermination de la fonction de la résistance pour chaque cas de réduction.

1.3.3 Une mathématisation "expérimentale" de la balistique. J. Kampé de Fériet

La méthode de Drach et Denjoy était sans doute une découverte puissante mais peu abordable pour les officiers militaires, ce qui nous incite à questionner l'utilité de la mathématisation de la balistique du xx^{e} siècle suite à la mobilisation des savants dans les institutions militaires comme Gâvre. Concernant les solutions exactes de Drach et Denjoy, Charbonnier juge leur impuissance face aux problèmes pratiques de la balistique :

> "Cette conquête, qui fait honneur aux mathématiciens, ne semble pas susceptible d'offrir aux balisticiens, jusqu'à nouvel ordre, des ressources nouvelles pour les applications. C'est que les calculs sont très compliqués et souvent presque sous forme de fonctions de séries ; il y a incompatibilité générale des formes trouvées pour $F(v)$ avec la loi réelle ; de plus on se heurte à l'impossibilité d'aller plus loin que

> l'hodographe intégrée, en laissant subsister, pour les autres éléments, toutes les difficultés de quadrature même tabulaire ; et, après cet effort, la vieille loi monôme $F(v) = B_n v^n$ subsiste comme acceptable pour le développement des théories balistiques." [Charbonnier 1928, 582]

Quoi qu'il en soit, nous attirons votre attention sur le fait que la mathématisation de la balistique n'est pas seulement une théorisation du domaine loin des applications pratiques. Par exemple, en admettant que la loi $F(v)$ soit monôme (dans le cadre de *la théorie d'Euler*), elle a produit des résultats non négligeables au niveau pratique, notamment au sein du calcul numérique des petites perturbations d'une trajectoire. Dans ce contexte, les mathématiciens comprenaient que leur apport pouvait être valorisé s'ils dirigeaient leur attention vers le calcul numérique et les formules d'approximations plutôt que vers les formules rigoureuses :

> " Mais les savants qui ont travaillé à Gâvre à des calculs très longs, très minutieux et très arides s'accordaient qu'au point de vue de la science pure, qui était leur domaine jusqu'ici, cette incursion dans les régions pratiques du calcul numérique, a été loin d'être inutile. Ils ont reconnu que la valeur d'une formule rigoureuse était chose relative, qu'elle paraissait souvent quand il fallait l'appliquer à un cas concret ; qu'une formule approximative était souvent d'un meilleur usage ; que le calcul numérique poussé à fond non-seulement réalisait l'épreuve de la théorie, mais qu'il constituait même un instrument de recherches susceptible de susciter des idées théoriques et que c'était là qu'on pouvait souvent trouver matière à découverte ; le calcul numérique est ainsi comme le domaine expérimental des mathématiques. " [Charbonnier 1928, 582]

Dans ce contexte, la contribution de Kampé de Fériet en balistique est cruciale pour comprendre l'utilité de la mathématisation de la balistique dans le milieu militaire. Mobilisé à Gâvre en juin 1916, il mit en œuvre ses connaissances d'analyse pour faciliter le calcul d'une fonction balistique permettant de résoudre complètement le problème principal de la balistique dans le cas d'une fonction monôme de la résistance de l'air. Dans un autre plan, il calcula les petites altérations des éléments de la trajectoire à l'aide de la mécanique céleste. Nous verrons que son attention vers les questions pratiques est présent dans les deux cas.

Les fonctions hypergéométriques dans la théorie d'Euler

Le cas d'une résistance monôme [40] est un cas particulier qui fournit une loi très simple qui permet d'aborder le problème du point de vue analytique et de trouver une solution complète et générale. Il s'agit d'un principe de base sur lequel sont fondées les tables de tir parce qu'il permet de donner des relations explicites entre les éléments d'une trajectoire sous forme de tables. Cette étude a des applications possibles notamment dans les tirs des mortiers et dans la méthodes de calculs par arcs successifs dans une trajectoire quelconque. Dans le détail, étant donnée une résistance de l'air monôme $F(v) = B_n v^n$, la composante horizontale de la vitesse $u = v\cos\tau$ et l'angle de projection α, l'hodographe sera de la forme :

$$\frac{d(u)}{d\tau} = \frac{c}{g} B_n v^{n+1}$$

En prenant un arc de trajectoire défini par (u_0, α) à l'origine et par (u, τ) à l'extrémité, l'intégration sera très simple et permettra de donner à chaque point de la trajectoire, la relation explicite entre u et τ :

$$\frac{g}{nB_n u^n} + \xi_n(\tau) = \frac{g}{nB_n} + \xi_n(\alpha)$$

Si l'on connaît de plus la forme de la fonction balistique suivante :

$$\xi_n(\tau) = \int_0^\tau \frac{dt}{\cos^{n+1} t}$$

le problème balistique est ramené alors à la fonction ξ_n. Depuis le XIXe siècle, les balisticiens avaient dressé plusieurs tables numériques de ξ_n pour toutes les valeurs de n. Ainsi, ce problème se traduit dans la recherche d'une expression de la fonction $\xi_n(\tau)$ qui permet de la calculer et de réaliser des tables de la manière la plus rapide et la plus simple possible.

Dans ce cadre, Kampé de Fériet, trouva en 1917 une expression de $\xi_n(\tau)$ à l'aide des fonctions hypergéométriques [41]. Sous certaines hypothèses et changements de

40. Le problème principal de la balistique dans le cas particulier où la résistance de l'air est monôme est appelé théorie d'Euler. Voir [Charbonnier 1927, Tome II] pour des détails sur cette théorie et son histoire.

41. *Expression de la fonction $\xi_n(\tau)$ par une fonction hypergéométrique* (reçue le 24 décembre 1917), [Académie des Sciences, dossier de balistique, Commission nommée pour l'étude des questions intéressant la défense nationale].

variable, il montre que $\xi_n(\tau)$ est une intégrale hypergéométrique :

$$\xi_n(\tau) = \frac{1}{2}\sin\tau \int_0^1 s^{-\frac{1}{2}}(1 - s\sin^2\tau)^{-(\frac{n}{2}+1)}ds$$

On peut alors l'exprimer par la série hypergéométrique de Gauss $F(\alpha, \beta, \gamma, x)$ sous plusieurs formes équivalentes, y compris la suivante :

$$\xi_n(\tau) = \frac{\sin\tau}{\cos^n\tau}F(\frac{1-n}{2}, 1, \frac{3}{2}, \sin^2\tau)$$

Cette dernière est une série de puissances en $\sin^2\tau$ convergente pour $|\sin\tau| < 1$. Ensuite il remplace cette série par une série trigonométrique de $\cos^n(\tau)\xi_n(\tau)$ procédant selon les sinus de multiples impairs de τ :

$$\frac{n+1}{2}\cos^n\tau\,\xi_n(\tau) = \sin\tau + \frac{n-1}{n+3}\sin 3\tau + \frac{n-1}{n+3}\frac{n-3}{n+5}\sin 5\tau + ...$$

Cette expression constitue une série rapidement convergente $\forall n \in \mathbb{Z}^+$ qui permet de calculer facilement $\xi_n(\tau)$ à double entrée (arguments τ et n) avec un nombre limité de termes. L'intérêt de cette recherche n'est pas seulement de nature analytique :

> "Sous cette forme on retrouve bien facilement toutes les propriétés connues de $\xi_n(\tau)$ et, en outre, certaines expressions nouvelles, qui peuvent avoir de l'intérêt du point de vue du calcul numérique de cette fonction."
> Kampé de Fériet, *Expression de la fonction $\xi_n(\tau)$ par une fonction hypergéométrique*, 1917.

Pour comprendre les raisons pour lesquelles Kampé de Fériet a utilisé ces fonctions spéciales en balistique, il faudra remonter à sa formation et ses travaux avant guerre. Sa formation ainsi que sa première activité de recherche sont dans le même esprit que son maître, Paul Appell. Après avoir reçu sa licence de mathématiques à la Sorbonne (octobre 1910-juillet 1912) [42] et un diplôme d'études supérieures de Mécanique Céleste (juillet 1913), Paul Appell lui proposa une thèse sur des fonctions spéciales qui ont des applications dans le domaine de la physique mathématique, les fonctions hypersphériques. Son manuscrit sera déposé le 1er juin 1914 mais la soutenance n'aura lieu que le 15 avril 1915 pendant un congé, car il était affecté à Argentan au dépôt du 104e régiment d'infanterie. Le but de sa

42. Pendant cette période, il suit les cours d'Elie Cartan, Edouard Goursat, Henri Lebesgue, Paul Montel, René Garnier, Gabriel Lippman et Paul Appell. Voir la biographie de Kampé de Fériet de Jean Delporte [Delporte 2002].

thèse était de synthétiser et approfondir la théorie des polynômes spéciaux d'Hermite $V_{m,n}(x,y)$ et leur généralisation $V_{m_1,..,m_n}(x_1,..x_n)$ c'est à dire les polynômes de Didion, à l'aide de la théorie des fonctions hypersphériques. Ici, il reprend les recherches d'Appell qui démontre que les polynômes d'Hermite $V_{m,n}(x,y)$ sont un cas particulier de fonctions sphériques déduites de fonctions harmoniques dans l'espace à q dimensions [Appell 1913b], [Appell 1913a]. Dans ce contexte, Kampé de Fériet montre - dans le même esprit que son maître pour les polynômes d'Hermite - que les polynômes de Didion peuvent être considérés comme des fonctions hypersphériques particulières, dont les propriétés sont déduites grâce à la théorie des fonctions harmoniques dans l'espace à $n+2$ dimensions. A partir de cela, il crée une théorie des fonctions hypersphériques visant à représenter les polynômes d'Hermite et leur généralisation dans le cas à n dimensions.

Le terme "hypergéométrique" apparait dans le deuxième chapitre de la thèse [Kampé de Fériet 1915, 35] dans lequel Kampé de Fériet exprime les polynômes de Didion au moyen de fonctions hypergéométriques à plusieurs variables de Lauricella afin de mettre en évidence plusieurs propriétés des polynômes $V_{m_1,..,m_n}(x_1,..x_n)$. Jusqu'à la fin des années 1930, il continuera à publier plusieurs notes sur les fonctions hypergéométriques et sur les fonctions hypersphériques. C'est pendant cette période qu'il démarre sa carrière internationale, en donnant des enseignements à l'université Jagellonne à Cracovie (semestre 1925-1926), à l'École Polytechnique de Varsovie (1926) et à l'Université de Prague (1929-1931). Le cours à Cracovie consacré aux functions hypergeometriques d'une variable donnera lieu à un volume autographié de 80 pages. De plus, son sejour en Pologne lui permettra de se lier aux mathématiciens polonais Stefan Banach et Hugo Steinhaus [Delporte 2002, 8] [43].

Son œuvre de prédilection dans ce domaine, *Fonctions hypergéométriques et hypersphériques*, est un livre rédigé en 1926 en collaboration avec Appell. Ce livre, d'environ 430 pages, recueille tous les mémoires des deux mathématiciens sur la théorie des fonctions hypergéométriques, des fonctions hypersphériques et leurs liens. L'ensemble de sa production sur les fonctions hypergéométriques et hypersphériques de 1913 à 1929 constitue la première phase de sa vie scientifique. Nous verrons dans la section 1.5 que cette première phase comprend non seulement sa contribution au domaine de l'analyse mais encore celle en balistique expérimentale qui se développe en parallèle et de façon indépendante.

43. Dans le fonds Kampé de Fériet nous n'avons malheureusement pas trouvé aucun document qui puissent donner des plus amples informations sur son séjour en Pologne et ses rapports avec Stefan Banach et Hugo Steinhaus.

La mécanique céleste dans la théorie des petites perturbations d'une trajectoire

La trajectoire plane calculée dans le problème balistique principal, est une trajectoire idéale qui suppose l'accélération g, la température et la pression constantes ainsi qu'une atmosphère calme. Pour préparer le tir, il faudra passer de cette trajectoire à la trajectoire réelle, obtenue en ajoutant à chaque élément de la trajectoire idéale un terme correctif δ qui lui est associé. Ces termes correspondent aux petites perturbations, provoquées par un grand nombre d'actions très faibles dérivant de la variation des éléments principaux de la trajectoire (α, u_0, c), la densité de l'air, la courbure et la rotation de la Terre, les effets du vent, la forme du projectile, le mouvement du but etc [44].

Dans ce cadre, les mathématiciens Haag et Kampé de Fériet ont donné une solution intéressante au problème suivant. Sur une trajectoire définie par les éléments principaux (α, u_0, c), on considère un arc $\Gamma(\alpha, u_0, c)$ et un arc $\Gamma(\alpha+\delta\alpha, u_0+\delta u_0, c+\delta c)$ d'une trajectoire voisine [figure 1.8]. Si M est le point du premier arc, appelons M' le point correspondant du deuxième arc dont la tangente a la même inclination τ. Quelles seront les variations des éléments de la trajectoire $\delta v, \delta x, \delta y, \delta t$, du point M' de la trajectoire altérée ? Kampé de Fériet trouva une

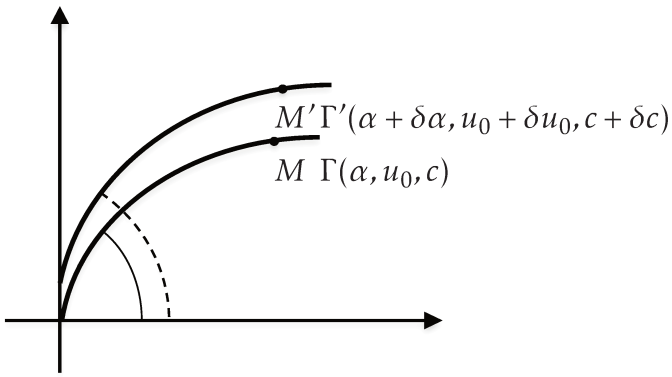


FIGURE 1.8 – Problème de la perturbation d'un arc de trajectoire.

solution générale en 1917, en développant une méthode numérique à partir des analogies entre la perturbation d'une trajectoire et celle d'une orbite d'un corps céleste dans le problème de n corps. Il s'agit d'un exemple-clé montrant que les méthodes de mécanique céleste sont encore applicables *mutatis mutandis* dans la balistique, la "sœur de la mécanique céleste" [45] :

44. Nous pouvons distinguer les corrections géométriques, les corrections de régime, les corrections aérologiques et celles astronomiques [D'Adhémar 1934, 31].
45. Citation extraite de [Charbonnier 1928, 573].

> " l'une qui s'occupe d'objets immuables, éternels et parfaits, se développe dans le pur domaine des mathématiques et des lois absolues ; l'autre, qui participe davantage des imperfections terrestres et est utilisée à des fins très peu spéculatives, marche terre à terre et pas à pas, hésite, revient en arrière, renie parfois son essence rationnelle pour ne plus vouloir être qu'une pure discipline expérimentale ; comme science d'application, elle est obligée de se plier aux exigences, aux idées, aux faits, aux modes du moment." [Charbonnier 1928, 573]

Dans sa note, *Sur le calcul des coefficients différentiels par la méthode des approximations successives* [46] Kampé de Fériet montre que les perturbations d'un élément d'un projectile peuvent être calculées en intégrant, par la méthode des approximations successives, l'équation aux variations correspondant à l'hodographe :

$$\frac{d}{d\tau}(\delta u) = \frac{c'}{g}\psi_\mu \delta u + (\frac{\delta c}{c} - h\delta y)\frac{c'}{g}\psi$$

Il s'agit de la même équation aux variations que celle définie par Poincaré dans son ouvrage *Les méthodes nouvelles de la mécanique céleste* (1892) [47]. Poincaré y avait envisagé un système d'équations différentielles $\frac{dx_i}{dt} = X_i$ $(i = 1, 2, .., n)$ et il avait obtenu les équations aux variations au moyen d'un développement en série de Taylor autour de l'une de ses solutions perturbées $\overline{x_1}, \overline{x_2}, ..., \overline{x_n}$. Il s'agit d'équations différentielles linéaires qui décrivent la théorie des perturbations dans la mécanique céleste. Kampé de Fériet ne mentionne jamais Poincaré dans sa note mais il utilise la même méthode pour déduire l'équation aux variations de l'hodographe écrite sous la forme :

$$\frac{du}{d\tau} = \frac{c'}{g}\psi(u, \tau) \qquad \text{dont} \quad u = \cos v; \quad c' = ce^{-hy}; \quad \psi = \frac{u}{\cos\tau}F\Big(\frac{u}{\cos\tau}\Big)$$

Ces équations sont obtenues sous l'hypothèse que la variation de la densité de l'air est fonction de l'altitude h constante calculée à Gâvre ($h = 10^{-4}$).

Kampé de Fériet ne cachait pas l'admiration qu'il avait pour Poincaré :

> Bien avant de commencer mes études scientifiques, j'avais été fasciné par le génie d'Henri Poincaré ; son père avait été le Médecin de ma famille ; tout petit j'avais entendu dire que le fils du Docteur était un célèbre Professeur, qui faisait des cours sur les étoiles, cours si difficiles que cinq élèves seulement étaient capables de les comprendre : c'est

46. Note reçue le 17 février 1917 [Académie des Sciences, dossier de balistique, Commission nommée pour l'étude des questions intéressant la défense nationale]

47. Voir la section sur les équations aux variations du chapitre IV du premier tome.

> ce dernier trait surtout qui frappa mon imagination enfantine. Bien entendu, au cours de mes études, l'image de l'auteur des Méthodes Nouvelles de la Mécanique Céleste s'était quelque peu précisée et enrichie [...] à la fin de l'année scolaire 1912, je m'apprêtais à suivre à la rentrée son cours de Mécanique Céleste ; le 17 juillet 1912 Henri Poincaré mourait d'une embolie post-opératoire [48] : il n'était âgé que de 58 ans [49].

Sur un plan différent et en dehors de la mécanique céleste, Haag résout ce problème dans le cadre de sa théorie générale des perturbations rattachée à la méthode G.H.M [Haag 1921]. Sans entrer trop dans le détail de sa théorie, il fractionne la trajectoire en petits arcs tels que $F(v)$ est quadratique sur chaque arc et il calcule les perturbations de x, y, t, v en utilisant la méthode de Gâvre et la théorie des erreurs.

A l'étranger, de façon similaire à Kampé de Fériet, deux autres mathématiciens ont recours à la mécanique céleste dans le milieu de l'artillerie : Kyrille Popoff (1880-1966) en Bulgarie et Mauro Picone (1885-1977) en Italie.

Popoff, astronome de formation et professeur à l'Université de Sofia, fut un spécialiste de la mécanique céleste de Poincaré. Lors d'un cours libre professé à la Sorbonne pour l'année 1925-1926, il utilisa l'intégration de Poincaré fondée sur le développement en série entière des solutions des équations différentielles de la trajectoire d'un corps céleste pour dessiner rapidement les trajectoires correspondant à des angles de tir différents. Sa monographie [Popoff 1925] lui vaut en 1926 le prix Monthyon de l'Académie des Sciences de Paris [50].

En Italie, Mauro Picone, le futur directeur de l'Istituto Nazionale per il Calcolo fut mobilisé dans la région du Trentino où il était chargé de calculer les corrections à apporter aux tables de tir existantes. En effet, ces tables fournissaient uniquement des données pour les tirs dont la cible et la batterie étaient supposées dans le même plan horizontal alors que dans cette région il fallait considérer les importantes dénivellations des Alpes. Face à l'impuissance des officiers militaires italiens pour trouver une solution à ce problème, Picone mit en place une méthode numérique pour renouveler les tables de tir de montagne : elles furent finalement en mesure de prendre en compte les tirs des canons de grand et moyen calibre en haute montagne, qui ont été rendus possibles grâce aux nouveaux moyens de transport et de remorque de l'époque [51]. La grande quantité de données et le besoin de faire des

48. Cours qui sera donné d'abord Henri Andoyer, bientôt remplacé par Appell.
49. Discours lors de la remise de l'ordre national du mérite, le 30 janvier 1971 [Archives de l'ONERA Lille, fonds Kampé de Fériet].
50. Sur Popoff voir [Mazliak 2012]
51. M. Picone, *Tavole da tiro di Montagna*, 1918. Sur la balistique extérieure de Mauro Picone

longs calculs pendant sa mobilisation furent décisifs dans son choix de se consacrer à l'analyse numérique après la guerre [Tanzi Cattabianchi 1977, 359]. A l'instar de Kampé de Fériet (et indépendamment), le mathématicien italien établit [52] les coefficients de correction pour les tirs avec grandes dénivellations au moyen des équations aux variations associées à l'équation de la trajectoire. La différence réside dans la façon d'intégrer les équations aux variations : Kampé de Fériet utilisa l'intégration par approximations successives alors que Picone employa la méthode d'intégration par série de Poincaré pour calculer les coefficients de correction.

Le rôle militaire des mathématiciens en France et en Italie. Quelques réflexions

Malgré l'emploi des mêmes méthodes, la réception de la note de Picone en Italie et celle de Kampé de Fériet en France a eu deux impacts différents au sein des institutions militaires auxquelles ils étaient affectés. Le travail de Kampé de Fériet sur les coefficients différentiels fut très apprécié par les officiers militaires de Gâvre [Charbonnier 1927, Tome II] et par le Ministre de la Marine qui lui donna un témoignage officiel de satisfaction le 4 novembre 1917 :

> " Monsieur Kampé de Fériet, docteur ès sciences, soldat auxiliaire, mathématicien très distingué, utilisé comme calculateur et rédacteur de procès verbaux de tir à la Commission de Gâvres, s'acquitte d'une façon parfaite de ses fonctions. Esprit chercheur qui a traité un intéressant problème de Balistique sur le calcul des coefficients différentiels. " [53]

Il en va de même pour les savants, citons à titre d'exemple Hadamard :

> "Un sujet classique au point de vue mathématique, s'est montré d'une grande importance au point de vue pratique puisqu'il gouverne l'étude des corrections de toute sorte à apporter au tir. " [Hadamard 1922, 441]

Ces recherches furent "entreprises pour répondre à certaines desiderata d'ordre pratique de M. Sugot", le chef de Kampé de Fériet qui travaillait entretemps sur une théorie des corrections rattachée à sa méthode des vitesses fictives. De plus, "leur publication pourrait présenter des dangers pour la Défense Nationale " [54]. Pour toutes ces raisons, la valeur pratique du travail théorique de Kampé de Fériet est bien loin d'être jugé comme inutile dans le milieu militaire.

[Tanzi Cattabianchi 1977], [Nastasi 2015].

52. *Formule razionali per la correzione del tiro*, 17 février 1917. Le papier de Kampé de Fériet a été reçu par l'Académie des Sciences le même jour !

53. J. Kampé de Fériet, dossier de candidature à la Société des Sciences, de l'Agriculture et des Arts de Lille, 1937, [Archives Départemental du Nord, 149 J 106].

54. Kampé de Fériet à Appell, le 17 février, 1917 [Académie des Sciences, dossier de balistique, Commission nommée pour l'étude des questions intéressant la défense nationale].

En Italie, en revanche, le général de l'armée italienne Ettore Cavalli (1861-1932) également professeur de balistique extérieure de la Scuola di Applicazione di Artiglieria e Genio à Torino, lance une dure attaque pas seulement contre les formules de correction de Picone mais aussi contre les deux notes de Balistique de Guido Fubini (1879-1943) [55] :

> "Dans l'ensemble, avec les trois notes examinées leurs auteurs n'ont apporté aucune sérieuse contribution au progrès de la balistique. Nous avons relevé dans l'une une légèreté insuffisante contraire à la prétention de tout vouloir juger, une superficialité à la fois dans les jugements et dans la tractation des divers sujets, une forme parfois peu sereine et souvent imprégnée d'une certaine nébulosité qui enveloppe la pensée d'un épais voile ; dans l'autre une boursouflure de l'élocution et une disproportion stridente entre les intentions exprimées et les résultats obtenus. [...]
> Les formules et les méthodes utilisées par eux semblent être étudiées sans souci de leur utilisation ; et à cet égard, nous rappelons qu'une note fait la distinction entre le théorique et le pratique. Or il est clair que, puisque c'est une branche de la science appliquée, une telle distinction n'a aucune raison d'exister ; dans ce cas, le théoricien doit savoir comment devenir pratique, c'est-à-dire qu'il doit diriger ses études vers des buts pratiques. " [Cavalli 1919, 75-76]

[56] Ensuite il mit en opposition les deux mathématiciens et Siacci, en indiquant

55. Il s'agit de deux notes : *Alcune formole di Balistica esterna con speciale riguardo al problema della correzione del tiro* (1917) et *Osservazioni sul calcolo della traiettoria di un proietto* (1917). Fubini jugea que cette critique ne s'adressait pas seulement à ses formules mais aussi à leur auteur et il contrattaqua avec la publication de *Osservazioni sui problemi di balistica esterna*. Mobilisé dans les Alpes comme Picone, il donna d'importantes contributions aux problèmes de la balistique de l'époque faisant plusieurs calculs de correction des tables de tir. Voir [Tanzi Cattabianchi 1981].

56.

> "In complesso con le tre note esaminate i loro autori non hanno portato alcun serio contributo al progresso della balistica. Abbiamo rilevato nell'una un'insufficiente leggerezza in contrasto con la pretesa di voler tutto giudicare, une superficialità tanto nei giudizi quanto nel trattare i vari argomenti, una forma talvolta poco serena e sovente soffusa di una certa nebulosità che avvolge il pensiero di fitti veli ; nell'altro une ampollosità dell'eloquio e una stridente sproporzione tra i propositi manifestati ed i risultati conseguiti. [...]
> Le formule ed i metodi da loro usati appaiono studiati senza alcuna preoccupazione del loro impiego ; ed a questo proposito ricordiamo che in una nota è stata fatta la distinzione tra il teorico e pratico. Ora è chiaro che, trattandosi di un ramo di scienza applicata, una tale distinzione non ha ragione di esistere ; in tal caso il teorico deve saper diventare pratico, deve cioè indirizzare i suoi studi a finalità pratiche." [Cavalli 1919, 75-76]

ce dernier comme un exemple typique à suivre. Encore, la critique de Cavalli va au delà des cas individuels de Picone et Fubini ; ce qu'il dénonce n'est pas seulement un manque de sens pratique des mathématiciens mais aussi l'isolement des officiers militaires aussi bien que leur modèle de formation, en prenant comme exemple la Scuola di applicazione di artiglieria e genio à Turin. Il souligne l'importance vitale de la collaboration entre mathématiciens et balisticiens et de même il croit fortement dans le fait que cette collaboration aura des fins pratiques destinées aux besoins de la guerre alors que les mathématiciens proposent des formules et des méthodes sans avoir le souci de leur emploi. D'après lui, c'est l'enseignement dans les écoles d'artillerie qui doit être renouvelé et doit se fonder sur une préparation moins théorique des officiers.

L'analyse de la réception du même travail dans des institutions militaires de deux ou plus pays différents -dont nous avons donné un petit exemple pour le cas de la France et l'Italie- pourrait faire ressortir d'autres éléments très intéressants concernant les relations entre mathématiciens et officiers militaires et leurs spécificités dans chaque pays.

1.4 La mécanique des fluides pendant la guerre

La mécanique des fluides est un domaine d'application dont les officiers militaires ont fait de façon directe ou indirecte un large usage dans plusieurs secteurs comme l'aviation, l'acoustique et l'aérodynamique balistique. Dans ce dernier cas, le lien entre balistique et mécanique des fluides est bien explicite : le mouvement de l'air qui traverse un projectile est étudié comme un fluide quelconque en utilisant les équations de l'hydrodynamique. En effet, sous certaines hypothèses, la résistance de l'air devient un cas particulier de la théorie de la résistance hydrodynamique dont l'obstacle en mouvement est le projectile. Les vitesses du projectile sont nettement supérieures à celles des avions ou de la théorie des sillages d'Henri Villat, Marcel Brillouin et Levi-Civita. Dans le cas de la balistique, l'air est supposé être un fluide compressible et non visqueux [57] et la thermodynamique joue un rôle fondamental : le mouvement est complètement défini par la pression, la densité et la température, fonctions qui satisfont les équations de la mécanique des fluides [Roy 1925] [58]. Ainsi, la loi de la résistance de l'air $F(v, \Theta)$ qui s'oppose au projectile

57. D'après un théorème d'Helmholtz, dans les mouvements rapides la compressibilité joue un rôle considérable alors que la viscosité et la conductibilité jouent un rôle faible. Ce résultat est généralisé par [Jouguet 1905].

58. Le polytechnicien Maurice Roy (1899-1985), fut professeur à l'École nationale d'aéronautique (mécanique du vol) de 1929 à 1939 et directeur de l'ONERA de 1949 à 1962. Dans sa note, il montre un aperçu sur les recherches de l'époque en aérodynamique balistique, en mettant en

obéit à la loi des gaz parfaits et elle est en fonction de la vitesse du centre de gravité du projectile v et de la température absolue $\Theta = (273 + \theta)$ de l'atmosphère :

$$F(v,\Theta) = kv^2\phi(\frac{\sqrt{\Theta}}{v}) \tag{1.10}$$

Si la vitesse est très petite, cette loi coïncide avec la loi de Reynolds qui s'applique dans les laboratoires d'aérodynamique pour étudier les essais sur la résistance d'une maquette :

$$F(v) = \rho v^2 D^2 \phi(\frac{\nu}{vD})$$

où ν est la viscosité cinématique de l'air et D la dimension linéaire de l'obstacle. Lorsque la vitesse atteint une certaine valeur ($v \sim 300 m/s$), l'allure de la fonction $F(v)$ change, passant de quadratique à linéaire.

Ce changement est lié à l'opposition de l'onde de choc (onde balistique) [Figure 1.9] qui fait perdre de l'énergie au projectile et augmenter la résistance de l'air.

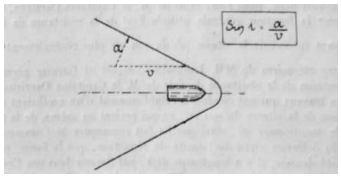


FIGURE 1.9 – Une onde balistique à grande vitesse [Darrieus 1922, 242].

La loi (1.10) fut introduite dans le domaine de la balistique en 1918 par Georges Darrieus [Darrieus 1922] [59]. En utilisant la théorie cinétique des gaz et celle des ondes de choc, il trouva que la résistance de l'air $F(v)$ dépend, entre autres variables, de la température de l'atmosphère. Cette découverte mit en discussion les tables de l'époque qui jusqu'alors n'avaient pas prises en compte le fait que la température déterminait une variation de $F(v)$ non négligeable, différente de saison en saison : il fallait donc modifier encore une fois les tables de tir existantes. En septembre 1918, la sous-commission de balistique de la Commission centrale de l'artillerie de Paris se réunit pour examiner la note de Darrieus, en prenant la décision de créer une commission mixte entre aérologie et balistique [60] visant à proposer des méthodes possibles de correction des tables de tir. Cette sous-commission comprenait outre le physicien Paul Langevin [61], des officiers de Gâvre notamment Garnier et Sugot, et le mathématicien Haag.

Langevin se proposa d'examiner du point de vue théorique et expérimental les données de Darrieus en confirmant leur exactitude sur la base d'une approche fondée non plus sur la théorie cinétique des gaz mais sur les équations de l'hy-

évidence comment certaines théories de la mécanique des fluides peuvent être appliquées dans la balistique.

59. Sur Darrieus, voir [Fontanon 2004].
60. Dossier " Étude Darrieus ", [SHD-Terre, 2W292].
61. Sur Langevin voir [Lelong 2002–01–01].

drodynamique [62]. Plus précisément, il fut en mesure de déduire la formule de Darrieus (1.10) en supposant que la variation de la pression p de l'air autour du projectile en mouvement soit décrite par les équations d'Euler auxquelles il faut joindre l'équation de continuité et les quatre conditions aux limites. Les données seront vérifiées grâce à la collaboration de deux physiciens Vaillant et Saphores :

> "En évacuant par une tuyère convergente-divergente un réservoir initialement rempli d'air comprimé, il est possible d'obtenir une veine gazeuse de vitesse supérieure à celle du son et d'y étudier, par voie d'enregistrement, les efforts exercés sur des modèles convenablement suspendus. J'ai pu, à cette occasion, vérifier expérimentalement l'exactitude des formules qui régissent la détente et l'écoulement d'un gaz comprimé. Une application intéressante de cette méthode a consisté à vérifier expérimentalement l'exactitude de la loi proposée par Darrieus pour exprimer la variation de la résistance de l'air en fonction de la vitesse du mobile lorsque cette vitesse peut atteindre ou dépasser la valeur critique représentée par la vitesse du son (81). Cette étude des effets produits par les courants d'air de grande vitesse a été poursuivie avec la collaboration de MM. P. Vaillant et Jean Saphores que je suis heureux de pouvoir remercier ici." [Langevin 1934]

Après avoir vérifié la véracité de la formule de Darrieus, l'étape suivante était celle de réviser toutes les tables de tir.

A Gâvre, Sugot et Garnier envoyèrent à la commission des communications afin de proposer des solutions différentes pour apporter les corrections. Dans le cadre de la M.B.T.A, Garnier [Garnier 1922], en collaboration avec les mathématiciens Haag et Valiron, indique "la manière pratique dont on peut calculer les altérations produites par une variation de $F(v)$ due à la température" [Garnier 1922, 18]. Sur un autre plan, Sugot proposait une solution différente : on pouvait éviter la réalisation des nouvelles tables de tir en ajoutant des tableaux à double entrée, dont la deuxième contenant les corrections pour la température et la densité de l'air [63].

Sur un autre niveau de l'aérodynamique balistique, Kampé de Fériet, dans sa note *Quelques remarques suggérées par l'hydrodynamique* (1918) utilisa un problème d'hydrodynamique d'Henri Villat pour déterminer la loi de la résistance de l'air à proximité du sol. Plus précisément, il s'appuie sur une étude de Villat

62. *Note sur la résistance de l'air et sur la correction d'élasticité proposée par le Capitaine Darrieus*, envoyée à la sous-commission de balistique le 6 octobre 1918. [SHD-Marine, série H, Archives de la Commission de Gâvre]

63. La note de Sugot sur cet étude se trouve dans [SHD-Terre, 2W292].

de la résistance d'un fluide incompressible à deux dimensions pour montrer que le voisinage d'un obstacle - le voisinage au sol - peut influencer la valeur de la résistance de l'air [64].

Ces travaux réalisés en 1918 montrent un premier contact de Kampé de Fériet avec la mécanique des fluides. Son expérience à Gâvre semble lui avoir permis non seulement de s'intéresser et réorienter ses intérêts vers le domaine de la mécanique des fluides mais aussi d'occuper, à la fin du conflit, un rôle institutionnel important dans ce domaine. Cependant, entre 1918 et 1929, aucune publication de Kampé de Fériet a été consacrée à la mécanique des fluides. D'après les documents biographiques retrouvés aux archives de l'ONERA Lille, les enseignements et la recherche effectués jusqu'au 1929 en tant que maître de conférence de mécanique rationnelle à la Faculté des Sciences de Lille sont consacrés à l'analyse, à la balistique, à la mécanique céleste et à la mécanique rationnelle. D'après ces documents, il ne donne qu'un enseignement complémentaire sur l'hydrodynamique entre 1920 et 1921 à la Faculté des Sciences de Lille et son premier engagement dans des commissions intéressant ce domaine semble être seulement en juillet 1934 en tant que membre du Conseil Supérieur des Recherches Scientifiques du Ministre de l'Air. S'il est vrai que la Commission de Gâvre a été une rampe de lancement pour sa carrière à l'IMFL, il est aussi vrai qu'il faudra clarifier sa situation entre cette expérience où il a eu ses premiers contacts avec la mécanique des fluides et l'année 1929 qui coïncide avec sa première véritable publication en hydrodynamique et sa désignation en tant que directeur de l'institut : qu'est-ce qu'il a effectivement fait en mécanique des fluides pendant cette période qui, d'après les documents retrouvés, semble être vide de ce point de vue ? Sa première publication, qui vise à développer quelques résultats concernant la théorie de la résistance d'un fluide parfait de Villat, remonte à 1929, la même année où il sera nommé directeur de l'IMFL : une coïncidence ?

A Henri Villat, qui fit preuve d'une grande considération de ses premiers travaux d'hydrodynamique du 1929 et soutint sa candidature pour la direction de l'IMFL, Kampé de Fériet dédia les mots suivants lors de son discours prononcé au titre de la remise des insignes de commandeur de l'ordre national du mérite : "Henri Villat, Fondateur et Chef de l'École Française de la Mécanique des Fluides, qui attira l'attention du Ministère de l'Air sur les modestes essais que j'avais effectués à la Commission d'Expériences de l'Artillerie Navale de Gâvre." Ces mots

64. Note des archives de la Commission de Gâvre. Il n'y aucune trace d'elle aux archives de la commission de Gâvre à Lorient. Nous sommes enclins à penser qu'elle soit perdue. Cependant, il est possible de lire son résumé dans son dossier de candidature à la Société des Sciences, de l'Agriculture et des Arts de Lille. Une autre note perdue est *Sur le mouvement par haute parallèle d'un fluide soumis à une force uniforme variable* (1918).

montrent que la contribution de Kampé de Fériet pendant sa mobilisation à Gâvre et le soutien d'Henri Villat ont sans doute favorisé sa candidature à la direction de l'IMFL. Cependant la manière dont Kampé de Fériet se reproche d'Henri Villat et du ministre de l'Air avant 1929, ainsi que les raisons pour lesquelles il publie sa première note d'hydrodynamique juste en 1929, sont obscures et mériteraient d'être clarifiées. Les "modestes essais" mentionnés ci-dessus comprenaient non seulement sa contribution en aérodynamique balistique mais aussi en balistique expérimentale, son domaine de prédilection qu'il poursuivra jusqu'à la fin des années 1920 comme nous verrons dans la section suivante.

1.5 Les mathématiciens et la balistique expérimentale. Le cas de Kampé de Fériet.

L'emploi de la photographie dans l'artillerie était déjà souvent utilisé avant la première guerre mondiale. Elle était exploitée pour prendre des photos des projectiles en mouvement, c'est à dire des phénomènes très rapides dont le temps d'exposition est très réduit : le flou est inadmissible et donc il faut recourir à des artifices spéciaux pour le réduire. Déjà en 1887 par exemple, les deux physiciens Peter Salcher et Ernst Mach publiaient leurs travaux sur l'enregistrement photographique du phénomène dans l'air causé par des missiles, photographies instantanées prises à grande vitesse et qui reproduisaient les ondes autour du projectile [65]. Plus tard, en 1904, Lucien Bull, un élève d'Étienne-Jules Marey, physiologiste et inventeur de la chronophotographie Marey, développa un appareil de cinématographie pour étudier le vol d'une balle de carabine à air comprimé. Plus tard il utilisera une technique similaire pour enregistrer photographiquement les ondes acoustiques [Schiavon 2014, chap. 6]. Ainsi du cliché, les officiers pouvaient tirer des valeurs numériques pour mesurer par exemple : la vitesse, la perte des vitesses liée à la résistance de l'air, restituer la trajectoire dans l'espace etc. [66].

A Gâvre, Kampé de Fériet non seulement commence à se familiariser avec la mécanique des fluides mais aussi avec les questions expérimentales, notamment la photographie et le travail en équipe. En collaboration avec le physicien Gabriel Foex il met en place, en 1918, une technique d'enregistrement très efficace pour mesurer les vitesses d'un projectile à travers un appareil à plaque mobile. La tech-

65. E. Mach et P. Salcher *Photographische Fixirung der durch Projectile in der Luft eingeleiteten Vorgänge* (1887).

66. Sur la photographie dans l'artillerie voir [Chalvet 1931]. Ce travail, réalisé sous demande de Charbonnier, dresse un paysage des appareils cinématographiques de l'époque (France et étranger) afin d'utiliser la photographie dans l'étude des questions intéressant l'artillerie. Ici, il fait une classification des appareils et il explique leur principe et leur ordre de précision.

nique était valable en plein jour sans l'aide d'éclairage artificiel, sur une plaque parallèle à la trajectoire du projectile, atteignant une vitesse proche de 1000 m/s et avec l'ordre de précision d'un millimètre. Cela constituait une nouveauté à l'époque, car normalement les essais étaient conduits pendant la nuit, avec des objectifs ouverts dans l'obscurité totale où le projectile était illuminé par une étincelle électrique.
Pour l'emploi de leur procédé ils réaliseront eux même l'appareil, à partir du matériel mis à disposition par la Commission de Gâvre. Dans cet appareil la plaque était un film qui s'enroulait au moyen d'un tambour de 4 cm de rayon par la chute du poids. Ici, Foex et Kampé de Fériet se sont servis d'un cinéma d'un vieux modèle, le "Cinépar" appartenant à la Commission de Gâvre. Plus précisément, ils ont utilisé l'un des objectifs de l'appareil Cinépar de longueur focale $f = 18cm$ et d'un objectif "Steinheil de Munich" n. 43303. La bande sensible de film a été mise à disposition par la Direction des Inventions. Les étapes successives de leur travail consistaient à utiliser ce dispositif pour exécuter au polygone de Gâvre (et parfois au polygone de Saint Pierre Quiberon) un grand nombre de sériés d'expérience en fonction de la dimension des canons. Ces expériences permettaient de recueillir un nombre suffisamment important de données expérimentales visant à perfectionner davantage le dispositif. Les premiers essais débutèrent en juin 1918 au polygone de l'Artillerie Navale de Gâvre. Leurs résultats recueillis jusqu'au 1er septembre 1919 sont contenus dans un dossier autographié et lithographié marqué sous le titre *Étude F2a n. 105* d'environ 300 pages (cf. annexe A) [67]. Par exemple, la première séance d'expériences eut lieu le 7 juin 1918 avec un canon de 19 cm tirant des boulets cylindriques, placé à 140 m en avant de la bouche du canon et à 68 m à droite du plan de tir. Sous des circonstances atmosphériques caractérisées par un ciel léger, les résultats ont permis de vérifier la bonne fonctionnalité de la méthode.
Un deuxième appareil (décembre 1918) [figure 1.13], plus sophistiqué et remplaçant l'installation rudimentaire réalisée par Foex et Kampé de Fériet pour tester leur méthode, a été construit à Gâvre par les ateliers de la Direction de l'Artillerie Navale de Lorient.

Dans cet appareil ([Figure 1.10]), le tambour et les poids sont remplacés par un chariot et l'électroaimant. L'image du projectile est reproduite sur un film reposant sur une plaque PP' mobile à vitesse w descendante. Cette plaque est montée sur un chariot CC' qui est maintenu dans sa position verticale supérieure par l'électroaimant : quand le courant est coupé le chariot tombe sous l'action de son poids et il y a impression du film. A chaque chute correspond 141 millimètres de film PP' imprimé.

67. [SHD-Marine, série H, Archives de la Commission de Gâvre]

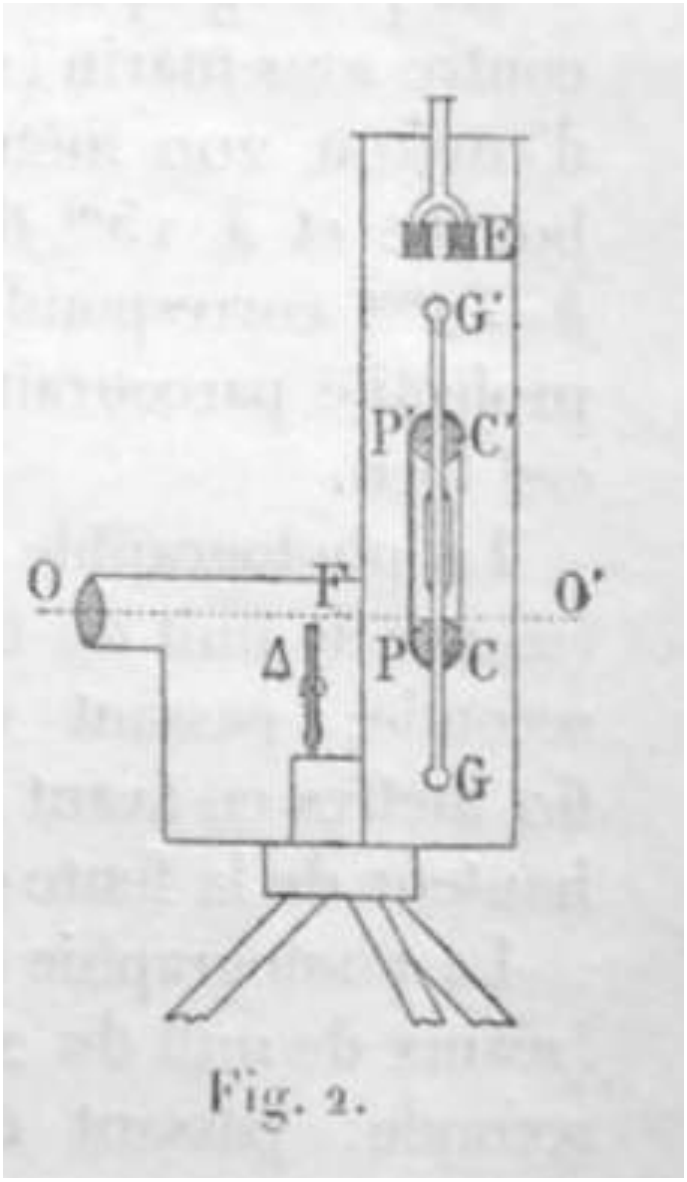


FIGURE 1.10 – Principe du 2[e]appareil.

Le premier (juin 1918) et le deuxième appareil (décembre 1918) disposaient d'une fente F rectangulaire située entre l'objectif O et la plaque PP'. On n'utilisait du champ de l'objectif que la portion découverte par la fente, sur laquelle se formait l'image d'un projectile. La plaque était animée d'une vitesse rectangulaire w verticale et perpendiculaire à la vitesse du projectile qui allait de gauche à droite. Pour une trajectoire avec un angle de tir quelconque, l'appareil dispose d'un prisme lequel, pivoté autour de l'axe optique, permet de conduire l'étude d'un tir quelconque à l'étude d'un tir horizontal selon le principe décrit ci-dessus. Cette méthode permettait de calculer :

— La prise des photographies posées des projectiles.
Si on imprime à la plaque w un mouvement sensiblement équivalent à la vitesse v de l'image du projectile, la durée de la pose de l'image devient relativement plus longue par rapport à un appareil à plaque immobile. En d'autres termes, l'image semble se reposer sur la couche sensible et elle apparaît immobile sur la plaque mobile en mouvement, permettant d'obtenir une grande netteté et donc une meilleure précision dans l'étude du projectile.

— La mesure de la vitesse des projectiles sous tous les anges de tir, spécialement leur vitesse initiale.
La vitesse du projectile V et celle v de l'image du projectile sont liées par la formule :

$$v = V\frac{f}{P} \tag{1.11}$$

où f est la distance focale et P la distance de l'objectif à la trajectoire. Ici, l'élément de trajectoire du projectile est considéré comme un segment rectiligne xx' de vitesse uniforme v ; la plaque parcourt un mouvement verticale yy' avec une vitesse w choisie du même ordre que v [Figure 1.11]. Le mouvement relatif de l'image du projectile sur la plaque en mouvement résultera alors de la composition des mouvements de vitesses v et $-w$. En partant de cette idée, chaque point est imprimé sur le film pendant la durée de son passage d'un bord a_1 à l'autre b_a de la fente F et il donnera lieu à une trace ab de l'image du projectile. La lecture du cliché permettra de déduire facilement la vitesse V du projectile grâce aux vibrations d'un diapason. Au cours de l'enregistrement du mouvement du projectile, les vibrations du diapason tracent sur la plaque une sinusoïde parallèle à yy' qui permet de calculer le temps du projectile pour aller de a à b et d'obtenir V au moyen de la formule (1.11).

— Étude de la sortie de la bouche du canon et des gaz qui l'accompagnent.

Concernant le deuxième appareil (décembre 1918-septembre 1919) [Figure 1.12], au cours de 9 séances furent prises 45 photographies posées (4 séances pendant les tirs de jours de la Commission, 5 séances pour les tirs de nuit faits sous demande de la M.B.T.A). Kampé de Fériet et Foex ont également effectué des mesures des vitesses d'un projectile sous différentes conditions impliquant le calibre (variant de 58 millimètres à 37 centimètres), angles de tir (de 1 à 2 degrés jusqu'à 70 degrés) et la vitesse (103 m/s jusqu'à 881 m/s).

Enfin, un troisième appareil encore plus précis fut réalisé après la guerre, en août 1924 [figure 1.14] en collaboration avec la Section Technique de l'Artillerie de Paris et mis à disposition de la Commission de Gâvre le 25 juillet 1928. Cet appareil [Kampé de Fériet 1925] a été fabriqué par l'officier militaire Mesnard, chef de l'atelier de précision à la Section Technique de l'Artillerie de Paris. Il s'agit d'un appareil qui vise à améliorer quelques détails techniques du deuxième. Foex et Kampé de Fériet ont fait fonctionner l'appareil du 1er au 25 septembre 1924 sur le polygone de Saint-Pierre-Quiberon. Les tirs d'essais ont comporté 47 coups d'un canon de 164 millimètres, 7 coups à une vitesse de 740 mètres par seconde et 22 coups d'un canon de 19 centimètres à une vitesse de 470 mètres par seconde.

L'importance du travail de Foex et Kampé de Fériet repose non seulement sur la mise en place d'une technique d'enregistrement photographique des vitesses d'un projectile mais aussi sur la conception du premier appareil (juin 1918) destiné à tester cette technique grâce aux résultats photographiques des séances de tirs de canon en fonction des dimensions du canon, de la distance entre le canon et l'objectif, des conditions météorologiques etc. La valeur de ce travail repose également sur le fait que ce dernier est le produit d'une interaction très étroite entre un mathématicien et un physicien où, cependant, le rôle de chacun d'eux n'est pas précisé dans les rapports techniques envoyés à la Commission de Gâvre ainsi que dans leurs publications. Tous ces documents sont toujours écrits à la première personne du pluriel et sont signés par tous les deux, ce qui rend difficile la compréhension du rôle de Kampé de Fériet dans la réalisation de ce travail par rapport à celui de Foex. De plus, il serait intéressant de savoir s'ils effectuent eux-mêmes les tirs de canon nécessaires à collecter les résultats ou il s'agit d'autres membres de la Commission de Gâvre. Ceci n'exclut pas toutefois la valeur expérimentale de ce travail, qui montre la manière dont certains mathématiciens pendant la guerre sont allés au-delà des questions théoriques de balistique pour aborder des questions expérimentales. Cet aspect marquera profondément la vie scientifique de Kampé de Fériet, comme nous le verrons dans le chapitre 3.

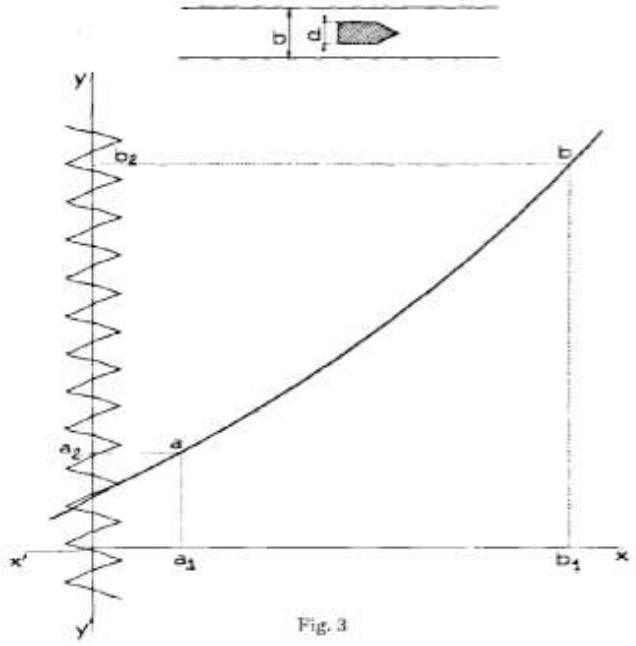


FIGURE 1.11 – Le mouvement relatif de l'image du projectile sur une plaque en mouvement [Vagner 1937, 36].

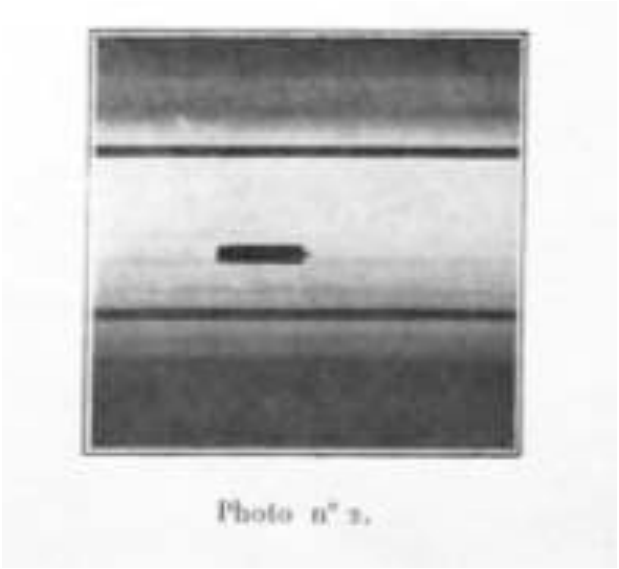


FIGURE 1.12 – Image d'un projectile tiré à une vitesse de 197,4 mètres-seconde, passant devant une flamme au magnesium (séance du 6 mai 1919) [Kampé de Fériet 1925, 203].

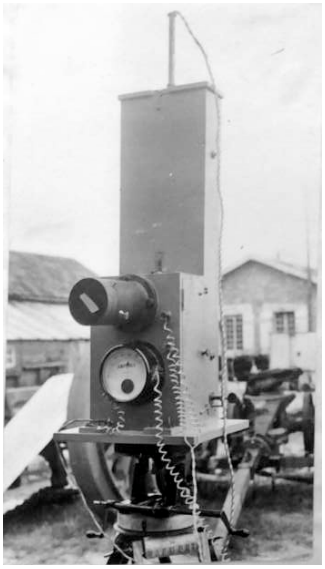


FIGURE 1.13 – Appareil II (1919), Commission de Gâvre.

FIGURE 1.14 – Appareil III (1924), Section Technique de l'Artillerie.

1.6 Conclusions

Le réseau que la trajectoire individuelle de Kampé de Fériet a pu créer au cours de ce que nous avons abordé dans ce chapitre est remarquable [Figure 1.16]. Ici, nous avons fait ressortir quelques éléments de continuité entre la mécanique des fluides et la guerre qui concerne de façon directe ou indirecte la mécanique des fluides, ce qui nous incite à faire deux types de conclusions.

1.6.1 Le cas inverse. La balistique dans la mécanique des fluides à l'IMFL

La méthode de Kampé de Fériet et de Foex sera exploitée avec succès en 1937 par son étudiant et futur chef de la soufflerie verticale, Jean Vagner. Dans sa thèse, *Étude par l'enregistrement photographique du mouvement accéléré d'une sphère tombant en chute libre dans un liquide visqueux* il se propose d'étudier la résistance hydrodynamique d'une sphère en mouvement accéléré tombant en chute libre dans un fluide. En effet, l'étude de la résistance hydrodynamique d'une sphère en mouvement peut s'effectuer en trois circonstances :

1. Fluide en mouvement autour d'une sphère immobile où il y a un dispositif qui décrit la force exercée par le fluide sur la sphère (soufflerie)
2. Fluide au repos et sphère en mouvement (canal hydrodynamique)

3. Sphère qui bouge sous l'influence de son poids, en chute libre ou qui oscille aux extrémités d'un pendule.

Ainsi, Vagner décida de traiter le troisième type de problème [68]. Ici, l'idée est de relever la hauteur de chute d'un ensemble de sphères en fonction du temps à travers la méthode Foex-Kampé de Fériet. Ensuite, à partir des valeurs expérimentales de la hauteur de chute, il sera en mesure de déterminer la vitesse et l'accélération de chaque sphère, et d'en déduire donc leur résistance hydrodynamique. Dans ce contexte, la méthode d'enregistrement continu du mouvement des corps de son maître intervient au moment de la détection expérimentale des hauteurs de chute des sphères. Afin d'adapter cette méthode à son problème, Vagner fait des petits changements. En effet, dans le problème de Kampé de Fériet le projectile a une vitesse sensiblement constante de façon à ce que que la plaque ait un mouvement w de translation constante ; par conséquent la trace obtenue est rectiligne. En revanche, dans le cas de Vagner, les sphères sont en mouvement accéléré et elles n'ont pas une vitesse uniforme ; leur trace aura donc une allure curviligne [figure 1.15]. Afin de rendre la méthode de Gâvre adaptée à son problème il imprime à la plaque un deuxième mouvement transversal, analogue à celui de la chute du corps, pour que la trace de la sphère soit sensiblement rectiligne.

1.6.2 Les liens avec le milieu militaire en temps de paix

Au niveau institutionnel, les liens entre certains mathématiciens et la Commission de Gâvre ne se sont pas interrompus après la guerre. En effet en 1920, la Commission changea son statut en introduisant pour la première fois des civils parmi les officiers militaires y compris les mathématiciens et les physiciens. Ainsi, dans le même esprit que celui de l'Ordnance Committee (Royal Navy) en Angleterre [69], ils deviennent partie intégrante de la commission. Cette décision constitue un "moyen utilitaire et pratique pour maintenir le contact entre la Commission et ses anciens collaborateurs " [70]. Suite à l'arrêté du 20 Avril 1920 [71], la commission de Gâvre présenta une nouvelle organisation qui incluait cette fois les *membres assistants*, "choisis parmi les personnalités dégagées de toute obligation militaire et qui, acceptant ce titre, sont qualifiés par leurs travaux sur les questions intéressant l'Artillerie (balistique, poudres, explosifs, physique, électricité, météorologie, instruments de mesure etc.)". En tant que membres associés, les universitaires

68. Pour cette classification, voir l'introduction [Vagner 1937].

69. L'Ordnance Committee (1881), qui jouait le même rôle que la commission de Gâvre, comprenait à côte des officiers de la Marine et de l'Artillerie, une trentaine de membres dits associés.

70. "Note pour la direction de l'artillerie navale", le 16 avril 1919, [Archives départementales du Pas-de-Calais, 81 J 1, Fonds Châtelet].

71. Arrêté interministériel portant l'organisation de la commission, signé le 20 avril 1920 par les ministres de la Marine, de la Guerre et de l'Instruction. Voir [Patard 1930, p.296].

pouvaient recevoir, par la commission, des communications correspondant à des études qu'ils pourraient aborder avec leurs compétences. Ainsi, sur décision ministérielle, les mathématiciens nommés membres assistants sont Kampé de Fériet de l'équipe de Sugot et Albert Châtelet, George Valiron, et Jules Haag de l'équipe de Garnier de la M.B.T.A. A l'exception d'Albert Châtelet [72], Valiron, Kampé de Fériet et Haag poursuivent leurs travaux après la guerre et ils donneront lieu à différentes publications.

Jules Haag, maître de conférences à Strasbourg, publiera en 1926 *Procédé rationnel permettant de vérifier la loi de Gauss (problème du commandant Lhoste)*, dans lequel il démontre de façon plus élégante un résultat de statistique mathématique du Commandant Ernest Lhoste de la Section Technique de l'Artillerie, portant sur l'estimation bayésienne des paramètres d'une loi normale et ses applications au tir. Sur le même sujet, il a également rédigé *Applications au Tir*, destiné à la collection des fascicules de Borel sur le Calcul de Probabilité et ses applications (1921-1939). Ici, il a appliqué la méthode de Lhoste à 956 coups de 75 (portée), 956 coups de 75 (direction), 384 coups de 155 (portée) et 384 coups de 155 (direction) [73].

Georges Valiron, maître de conférences à Lyon, continue ses travaux sur les méthodes numériques pour calculer les tirs aériens. En 1927 il publie *Calcul des trajectoires par arcs successifs et calcul des altérations par la méthode anglaise de Portsmouth* (1927) et, en collaboration avec Henri Dodier, *Calcul des trajectoires curvilignes par arcs et des altérations d'après les méthodes américaines* (1927). En 1939-1940, avant l'occupation allemande de l'IHP, l'institut sera divisé en six laboratoires et George Valiron sera à la tête de celui de balistique [Siegmund-Schultze 2009a, 128].

Kampé de Fériet, maître de conférences à Lille et membre assistant de Gâvre de 1922 à 1944, poursuivra en temps de paix sa collaboration avec Foex dans le cadre de son travail expérimental sur l'enregistrement photographique des vitesses d'un projectile. Sur ce sujet, il publiera trois articles pendant les années 1925-1926 et présentera les résultats à l'ICAM à Zurich en 1926. Après cette date, Kampé de Fériet quittera définitivement ses travaux de balistique.

Dans ce contexte, nous pouvons donc nous demander quelles sont les conditions de pérennisation des réseaux mathématiciens-militaires durant l'après-guerre. A ce propos, nous pouvons faire une comparaison entre le cas de Kampé de Fériet et le cas d'Haag : tous deux ont réorienté une grande partie des leurs

72. Dans son dossier militaire il n'y a pas de documents qui attestent d'un possible prolongement de son activité scientifique dans le milieu de la balistique.

73. Sur Haag et la méthode de Lhoste voir [Hadjadji Seddik-Ameur 2003]. Sur *l'application au tir* voir [Bustamante et. al. 2015].

recherches vers les mathématiques appliquées après la guerre. Haag, qui était un spécialiste des fonctions harmoniques et des familles de Lamé, a commencé à s'intéresser à des questions plus pratiques pendant la guerre où il a collaboré avec l'officier militaire Garnier et le professeur Marcus pour améliorer la méthode de Gâvre nécessaire pour créer de nouvelles tables de tir visant à prendre en compte des trajectoires avec un angle de chute toujours plus grand qui puisse permettre de tirer contre les avions. Après la guerre, il dirigera son attention vers les questions d'horlogerie et d'engrenages et il acceptera la direction de l'institut de chronométrie de Besançon en 1927.
Comme Kampé de Fériet, Haag sera nommé membre assistant de la Commission de Gâvre après la guerre mais sa recherche en balistique semble plus isolée par rapport à celle du mathématicien lillois si nous analysons la circulation de leurs travaux d'après-guerre dans le *Mémorial de l'Artillerie Française*. Cela semble dépendre, entre autres facteurs, de la nature des recherches effectuées en relation avec la sphère militaire. En regardant les travaux d'après-guerre publiés par Kampé de Fériet dans cette revue militaire, nous pouvons remarquer qu'il n'a poursuivi que ses travaux de balistique expérimentale concernant l'enregistrement photographique des vitesses d'un projectile, travaux effectués toujours en collaboration avec Gabriel Foex. Dans ce contexte, nous pouvons voir des réseaux entre mathématiciens et officiers militaires très explicites car il s'agit d'un travail demandé par la Commission de Gâvre et pour lequel les officiers militaires continuent à contribuer et à collaborer avec lui et Foex pour progresser dans ce type de recherche. En effet, c'est l'Atelier de la Commission de Gâvre qui réalise l'appareil d'enregistrement et c'est la Section de l'Artillerie de Paris qui le perfectionne. Les essais sont encore effectués à Gâvre et il y a donc une collaboration très forte et très explicite avec les militaires qui appréciaient fortement leur contribution. En ce qui concerne Haag, les travaux d'après-guerre publiés dans le *Mémorial de l'Artillerie Française* concernent plutôt des travaux de balistique théorique sur les applications du calcul des probabilités dans l'étude du tir (déterminer les lois de probabilités de la trajectoire d'un projectile) comme par exemple le problème du commandant Lhoste. En d'autres termes, il s'agit de problèmes qui ne font pas appel directement à des officiers militaires, il n'y a qu'une implication mineure.

Une analyse de la nature de travaux des mathématiciens publiés dans les journaux à caractère militaire pourrait donc apporter quelques réponses à la question des conditions de pérennisation des réseaux mathématiciens-militaires durant l'après-guerre. Cependant, il faudra considérer d'autres angles d'attaque pour avoir un cadre plus précis de ce contexte. Des travaux ultérieurs pourraient, par exemple, prendre en compte aussi les dossiers techniques non publiés ainsi qu'envisager des parcours d'autres mathématiciens mobilisés à la Commission de

Gâvre et dans d'autres institutions militaires qui sortent de l'orbite de Kampé de Fériet.

CHAPITRE II

APPLICATION de la MÉTHODE de MESURE
de la VITESSE des PROJECTILES de MM. KAMPÉ de FÉRIET et FOËX
au RELEVÉ de l'ESPACE PARCOURU
et du TEMPS CORRESPONDANT par un CORPS
TOMBANT VERTICALEMENT dans un FLUIDE TRANSPARENT

I. — Mouvement de la plaque photographique.

Dans les mesures de la vitesse des projectiles par enregistrement photographique de MM. KAMPÉ DE FÉRIET et FOËX, le projectile avait une vitesse

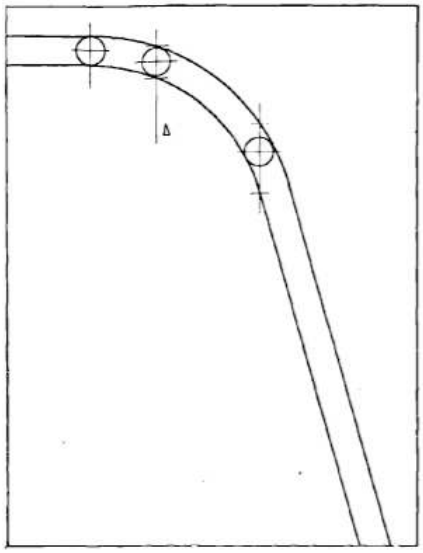


Fig. 4

sensiblement constante pendant la durée de la photographie, de sorte qu'en imprimant à la plaque photographique un mouvement de translation à vitesse

FIGURE 1.15 – Allure curviligne du mouvement de la sphère accélérée [Vagner 1937, 36].

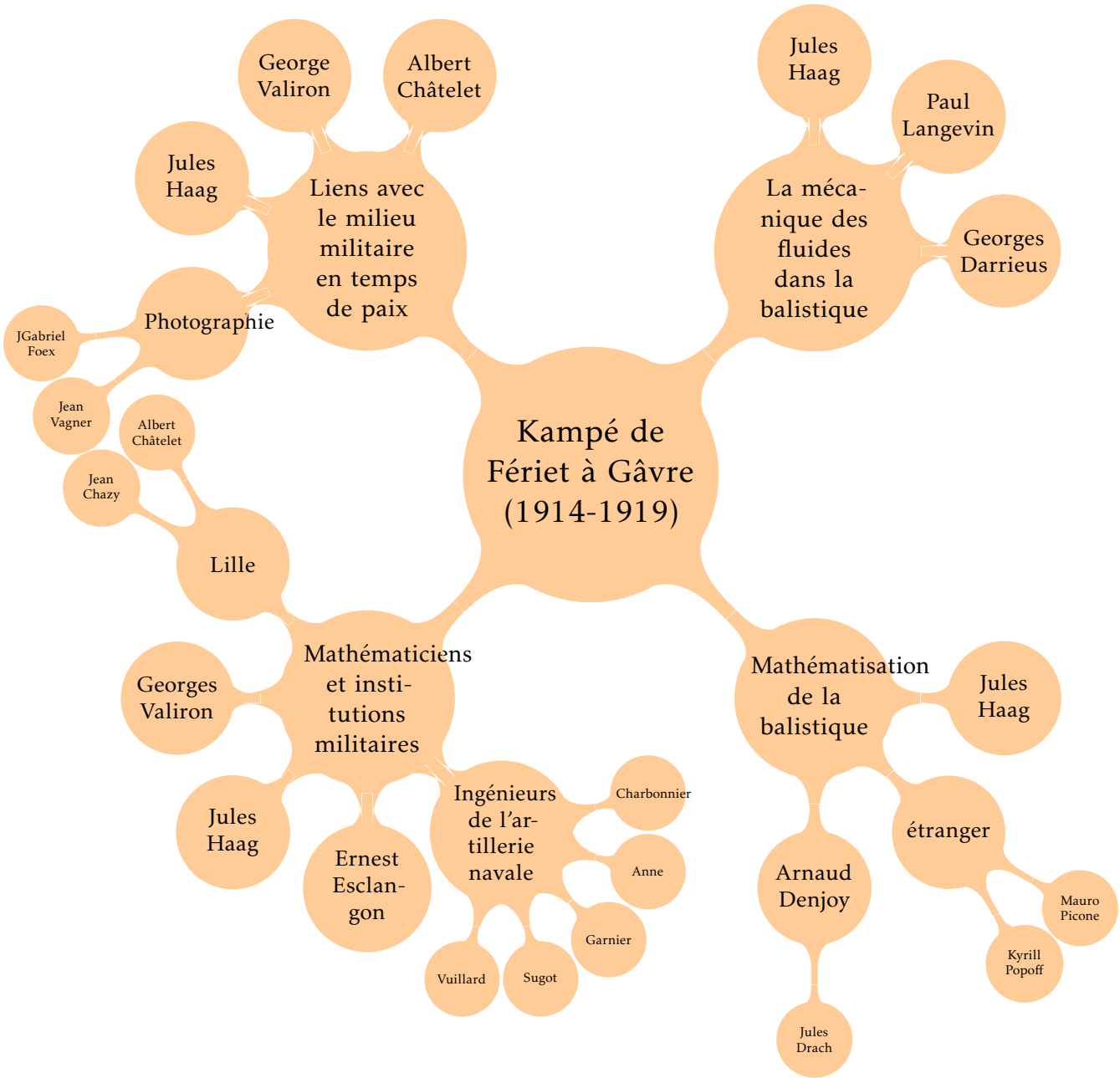


FIGURE 1.16 – Réseaux des savants en liaison avec Kampé de Fériet pendant sa mobilisation à Gâvre.

Chapitre 2

L'institutionnalisation de la mécanique des fluides : le cas de l'IMFL

> Je crois en l'avenir de cette maison, j'y crois parce que j'ai confiance en mes collègues, les professeurs de l'Université, parce que j'ai confiance en mes jeunes amis les étudiants qui peuplent nos cours et nos laboratoires, parce que j'ai confiance en mes compatriotes de cette région qui dirigent les administrations et l'industrie.
>
> Albert Châtelet (1934)

Vers 1890, J. Boussinesq écrivait en substance : "comment se fait-il qu'il n'y a ait en France aucune chaire d'hydrodynamique ? Il y a partout des chaires de mécanique céleste : l'hydrodynamique n'est-elle pas aussi intéressant et utile ?" [1]. Effectivement, au début du xx^{e} siècle, il n'y avait aucune chaire de mécanique des fluides en France. L'hydrodynamique était enseignée dans les cours de mécanique rationnelle et d'hydraulique professés dans les Facultés des Sciences ainsi qu'au sein des écoles d'ingénieurs et de certains instituts électrotechniques.

1. Martinot Lagarde, *l'enseignement de la mécanique des fluides à l'IDN*, Liaison IDN industrie, [Archives de l'Association des Centraliens de Lille].

D'après l'historiographie sur l'aéronautique française, les premières chaires de mécanique des fluides furent créées seulement pendant les années vingt en vue de rattraper le retard scientifique et technologique que l'aéronautique française avait accumulé après la guerre 1914-1918 [2]. Plus précisément, l'aéronautique française et son industrie ne posaient pas de problèmes jusqu'à la fin de la guerre, lors de la la première phase de son évolution [3]. D'après l'historien Emmanuel Chadeau, dans les années vingt il y eut des innovations à l'étranger et la France eut des retards dans cette évolution internationale. Cette innovation s'explique par le fait qu'à cette époque les différents pays entamaient de nouvelles recherches d'aérodynamique poussées : l'aéronautique commençait à avoir une forte composante scientifique [Chadeau 1985]. Afin de participer à cette évolution aéronautique internationale, la France devait donc mettre en place un plan de renforcement de la formation et de la recherche en aérodynamique et, plus en général, de la mécanique des fluides, frappée par plusieurs lacunes de nature scientifique et institutionnelle. En effet, les recherches françaises en mécanique des fluides, qui accordaient peu d'attention aux aspects expérimentaux ainsi qu'aux milieux industriels et militaires, étaient moins connues par rapport à celles de ses voisins. L'Institut de Saint Cyr (1909) et le laboratoire Eiffel (1903) "constituent un cas un peu exceptionnel dans un paysage universitaire français connu pour son mépris à l'égard des applications de la science et ses fortes réticences à nouer des relations avec la sphère technique et industrielle, et plus encore avec les militaires" [Fontanon 1998, 58].

Face à cette situation, l'état décide alors de prendre position et il se charge de construire un programme national dont l'action est destinée à combler les lacunes que la mécanique des fluides avait accumulé au niveau de la recherche et de la formation technico-scientifique, au-delà du fait de renforcer ses rapports avec les milieux militaire et industriel. Dans ce contexte, l'institutionnalisation de la mécanique des fluides devient un exemple de la manière dont l'état, déjà durant les années vingt, joue un rôle novateur et s'engage pour construire un plan d'intervention pour la recherche scientifique nationale [4]. A cela s'ajoute la tendance de certains des universitaires à maintenir, en temps de paix, le réseau industrie-université-militaires avec lequel ils se sont familiarisés pendant leur mobilisation scientifique. Cela se traduit alors parfois par un véritable effort dans

2. Sur l'histoire de l'aéronautique française voir [Carpentier 2011] et [Weber 2008] ; pour un contexte international de l'aérodynamique voir [Anderson 1997].

3. La première phase comprend d'abord les premiers vols d'engins à moteur capables de décoller par leurs propres moyens et, en temps de guerre, l'utilisation de l'avion comme une arme.

4. D'autres programmes similaires (plan calcul et plan électronique) suivirent après la deuxième guerre mondiale. Voir [Mounier-Kuhn 1996, 187] ; sur le plan calcul et le plan électronique voir [Mounier-Kuhn 2010]

la création d'instituts dont le modèle s'inspire de celui qu'ils avaient connu dans les institutions militaires. Tel est le cas par exemple de la Commission de Gâvre que nous avons analysé dans le premier chapitre.

Il résulte de ce qui précède que le processus d'étatisation semble avoir ses origines et ses développements chez les institutions intéressant l'aéronautique, soucieuses de renforcer l'aérodynamique (et plus en général la mécanique des fluides) en vue de redonner à la France le rôle international et compétitif qu'elle avait perdu depuis 1918. Plus précisément, après la création de la Section Technique de l'Aéronautique (1916) [5] et les nombreuses initiatives de Paul Painlevé visant à promouvoir la recherche aéronautique à travers un projet publique d'ampleur nationale [6], un sous-secrétariat d'État à l'Aéronautique et aux Transports Aériens fut institué en 1919 afin d'organiser le système aéronautique. Emile-Laurent Eynac, aviateur de 1914-1918 et sous-secrétaire d'État de 1921 à 1923, réussit à obtenir des financements par la chambre des députés pour créer en 1923 un pôle scientifique de la mécanique des fluides à Paris. Le titulaire de la première chaire de mécanique des fluides en France fut Paul Painlevé [7].

L'accident d'avion où périt le Sous-Secrétaire d'État Maurice Bokanowski suscitera la création, en 1928, du ministère de l'Air par Laurent Eynac, qui nommera Albert Caquot (1881-1976) [8] directeur général de la Section technique de l'Aéronautique. La position du ministre était très claire : combler les lacunes en mécanique de fluides permettrait de rattraper le retard scientifique dans le

5. Appelée quelques années plus tard sous le nom de Service technique de l'aéronautique (STAé).

6. Paul Painlevé joue un rôle fondamental dans ce contexte où il s'engage explicitement pour élargir le domaine de la mécanique des fluides aux mathématiciens et aux physiciens, car il est convaincu que seulement le recours aux savants peut permettre de faire progresser la recherche aéronautique puisqu'ils disposent des compétences théoriques pour pouvoir le faire alors que les ingénieurs qui ont la tâche de résoudre les problèmes le plus vite possible, n'ont pas le temps de se consacrer à des recherches plus théoriques. En 1909 il avait aussi même soumis au parlement un projet de création d'un laboratoire national d'aviation fonctionnant sous la responsabilité de l'état. Ce projet ne fut pas retenu. A ce propos voir [Anizan 2006, 129].

7. Sur le pôle parisien de la mécanique des fluides voir [Fontanon 2017].

8. Albert Caquot (1881-1976) fut un élève de l'École Polytechnique, de l'École des Ponts et de celle d'aéronautique. En 1914 Caquot fut affecté à une compagnie d'aérostiers à Toul. C'est ici qu'il imagine un ballon de forme allongée stable pour un vent de 25 m/s qui dépasse les insuffisances des vieux ballons sphériques Renard, instables sous un vent de 10 m/s. Grâce à la conception de ce ballon, le ballon Caquot, il fut nommé Directeur Technique de l'Aviation où il s'engage pour indiquer aux constructeurs aéronautiques la voie à suivre pour perfectionner leurs modèles. Après la guerre, il développa sa carrière de constructeur dans l'Entreprise Pelnard, Considère et Caquot où il se consacra à la construction de grands ouvrages en béton armé jusqu'à sa nouvelle position de Directeur général technique de l'Aéronautique en 1928. Sur sa biographie voir [Kerisel 2001].

domaine de l' aéronautique, vus les multiples liens entre ces deux domaines scientifico-techniques. En 1929, il déclare :

> "En ce qui concerne les problèmes relatifs à la sustentation même des avions, la question se présentait plus complexe [par rapport aux autres secteurs scientifiques susceptibles de contribuer aux recherches de l'aviation (métallurgie, mécanique, physique et chimie)], puisqu'il fallait créer le cadre même des recherches qu'ils nécessitent ; la mécanique des fluides tout au moins sous son aspect expérimental n'occupait en effet dans les Universités françaises qu'une place extrêmement réduite vis-à-vis de ce qui serait nécessaire pour fournir les bases des perfectionnements à rechercher" [9]

L'état devait donc intensifier encore plus son action à travers l'institution dans les universités de province d'un programme national de recherche et d'enseignement destiné aux mathématiciens, physiciens et ingénieurs et capable de les orienter vers les problèmes de mécanique des fluides et du vol, théoriques mais surtout expérimentaux.

Ainsi, sous l'impulsion de Caquot, très proche de Paul Painlevé et soutenu par le concours d'Henri Villat, en 1929 le ministère de l'Air eut l'idée de disséminer sur les autres universités de province d'autres pôles de mécanique des fluides. A ce propos, il créa trois instituts (Lille, Marseille, Toulouse) et cinq chaires [10] (Caen, Lyon, Strasbourg, Nantes et Poitiers). La même année, Paul Painlevé confiait la direction de l'institut de mécanique des fluides de Paris à Henri Villat [Figure 2.1]. En parallèle, le ministre de l'Air lancera également la création de plusieurs souffleries, centre d'essais et d'autres instituts de formation en aéronautique à côté des laboratoires et des cours d'aéronautique préexistants mis en place à partir du début du xx^{e} siècle [Figure 2.2]. Là encore, son programme national prévoyait la nationalisation de l'industrie aéronautique [11]. En ce qui concerne les instituts de mécanique des fluides de Paris et de Toulouse des études ont été faites récemment et respectivement par Claudine Fontanon et François Charru [Fontanon 2017] et [Charru 2017–08]. Quant à l'institut de mécanique des fluides de Lille (IMFL) son histoire est presque inconnue.

9. Circulaire du Ministre de l'Air, 22 mai 1929 [Archives de l'ONERA Lille].

10. Il est probable que même la ville de Rennes fasse partie de cette liste mais nous n'avons pas de documents officiels qui le confirment.

11. Afin de donner un élan à l'industrie aéronautique et se focaliser dans la production en série, le gouvernement (Front Populaire) nationalise l'industrie aéronautique à travers la création de six sociétés nationales de constructeurs (SNCA). La section du Nord, la SNCAN, comprend la Maison Potez et une partie des usines Bloch [Weber 2008].

L'objet de ce chapitre est de reconstruire la vie de l'IMFL en prenant comme point de départ à la fois le contexte institutionnel et social de la ville de Lille, et celui scientifique de la mécanique des fluides française dans lequel l'institut même a été créé. Dans ce but, nous nous sommes appuyés sur l'ensemble des documents repérés dans le fonds Kampé de Fériet des Archives de l'ONERA de Lille ainsi que dans les archives de l'Association de Solidarité des Anciens de l'Université Lille 1 (ASA), les Archives Départementales du Nord et les Archives de l'Association des Centraliens de Lille. L'énorme quantité des données obtenues à partir de la consultation de ces archives a conduit à un travail pour les organiser réparti en deux phases. Dans la première phase, nous avons utilisé les documents de l'ASA, notamment les Annales de l'Université de Lille et les rapports annuels de Kampé de Fériet sur l'IMFL, pour recréer le fil conducteur de la vie de l'institut envisageant la période qui va de sa création à son repli à Toulouse suite à l'occupation allemande de Lille, en 1939. Puis, dans la deuxième phase, nous avons développé ce fil conducteur en essayant de répondre à trois questions-clés :

1) Pourquoi et comment un institut de mécanique des fluides a-t-il été fondé à Lille ?

2) Qui sont les acteurs et quels sont les lieux de l'institut où ils agissent ?

3) En quoi consistent les activités de l'institut et quel est son impact sur la société lilloise et les autres centres de mécanique des fluides de Lille ?

Les documents contenus dans les Archives de l'ONERA de Lille ont permis de dresser un cadre exhaustif de l'institut : les accords avec l'université de Lille, le ministre de l'Air et l'industrie locale, les liaisons avec les autres institutions techniques, la nature des financements pour créer les bâtiments et réaliser les installations, l'activité de recherche, etc.. Cependant, nous avons rencontré certaines difficultés tout d'abord en ce qui concerne notamment la reconstruction biographique des collaborateurs de Kampé de Fériet et, ensuite, l'activité didactique de l'institut. Malgré l'énorme masse de documents à disposition, le recueil de données biographiques ne nous a permis que de donner une vision partielle de ce qui était leur vie scientifique à l'intérieur ou à l'extérieur de l'institut. Nous avons une situation similaire pour les cours dispensés par l'IMFL à cette époque-là, cours que si nous aurions retrouvé, nous auraient fourni de plus amples informations sur les activités de l'enseignement de l'institut. Quoi qu'il en soit, nous avons fait tout le possible pour faire ressortir la vie des "moins inconnus", des "plus petits" et les aspects qui ont caractérisé l'enseignement de l'institut.

En général, les instituts de mécanique des fluides sont des organismes permanents créés à travers une convention entre le ministre de l'Air et les Facultés des

Sciences jouissant d'une certaine *autonomie* : ils recevaient des subventions non seulement par l'état (université et ministre de l'Air) mais encore par les industries et d'autres administrations locales à travers des recettes commerciales. Dans ce contexte, cette autonomie nous permet de comprendre, au moins en partie, la mesure avec laquelle chaque institut peut d'un côté exploiter le potentiel économique de la région où il est installé et de l'autre côté essayer de "préserver la tradition scientifique de la ville" en poursuivant les recherches existantes à côté de nouvelles recherches. L'IMFL par exemple, en liaison avec l'entreprise aéronautique Potez, développera des recherches en aérodynamique orientées vers la théorie de la turbulence, une thématique de recherche lilloise depuis au moins 1872 avec Joseph Boussinesq. Il en est de même pour l'institut de mécanique des fluides de Toulouse et ses recherches en hydraulique fluviale qui ne sont qu'un prolongement de celles effectuées à l'institut électrotechnique déjà à partir de 1908. Par suite, au niveau de la formation et de la recherche, cette autonomie confie à chaque institut des caractéristiques que les autres n'ont pas : il y aura des aspects en commun dépendant surtout de programmes nationaux établis par le ministre de l'air, et d'autres aspects qui sont caractéristiques de chaque institut. C'est pour cette raison que nous avons introduit au cours du chapitre des éléments comparatifs entre l'IMFL et les autres instituts, afin de faire ressortir cette autonomie. En particulier, les éléments comparatifs concernant l'institut de mécanique des fluides de Marseille nous semblent des éléments nouveaux, étant donné que cet institut n'a été pas encore étudié à l'heure actuelle si on le compare aux centres de Paris et Toulouse.

Le plan du chapitre est chronologique et il se développe jusqu'en 1939. La première section explicite le contexte de la mécanique des fluides en France avant la création des Instituts de Mécanique des Fluides. Cette section est importante pour comprendre la grande complexité de ce paysage, caractérisée par l'existence de recherches théoriques de premier plan, une production aéronautique importante et une institutionnalisation significative du domaine de l'hydraulique. Cela amène à prendre avec plus de distance l'argument des acteurs qui s'appuient sur le fait que la création des Instituts de Mécanique des Fluides est une solution à des besoins bien précis liés au retard technologique et scientifique que l'aéronautique et la mécanique des fluides avaient accumulé depuis la fin de la première guerre mondiale.

Les deuxième et troisième sections se focalisent sur Lille. En particulier, la deuxième présente concrètement la création de l'IMFL et de ses propres bâtiments, en mettant en évidence le dynamisme industriel et universitaire qui offre à l'Institut un terrain favorable pour son installation. Quant à la troisième, elle donne le récit des dix premières années de l'IMFL sous la direction de Kampé de

Fériet. Elle vise à décrire sa vie (enseignement et recherche), ses installations et ses acteurs ainsi que son ouverture à l'industrie et aux autres pôles de mécanique des fluides. Dans ce cadre, l'IMFL sous la direction de J. Kampé de Fériet devient un exemple pour dénicher des aspects plus généraux concernant l'institutionnalisation de la mécanique des fluides en France pendant l'entre-deux-guerres, dans une perspective multi-échelle, du régional au national.

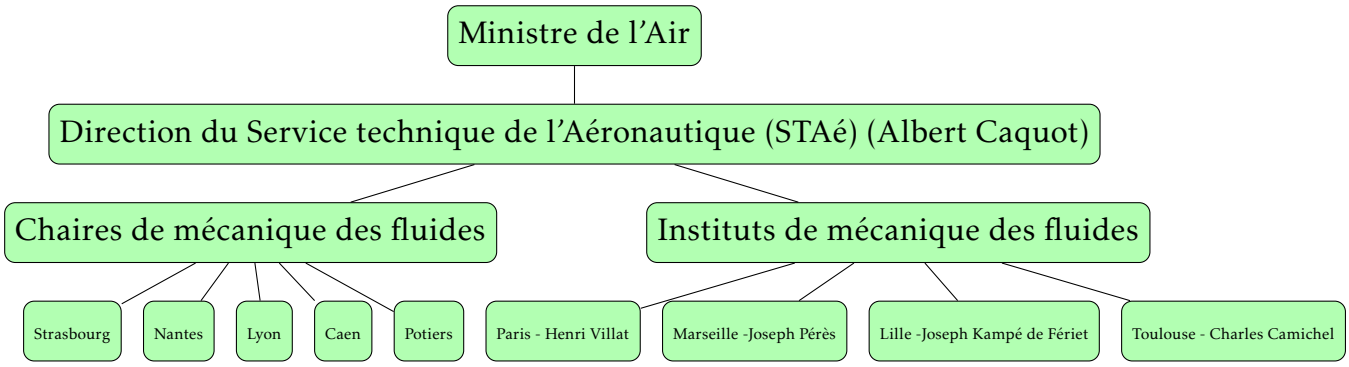


FIGURE 2.1 – Réseau des pôles de mécanique des fluides créé en 1929 par le ministre de l'Air en collaboration avec les universités des villes désignées.

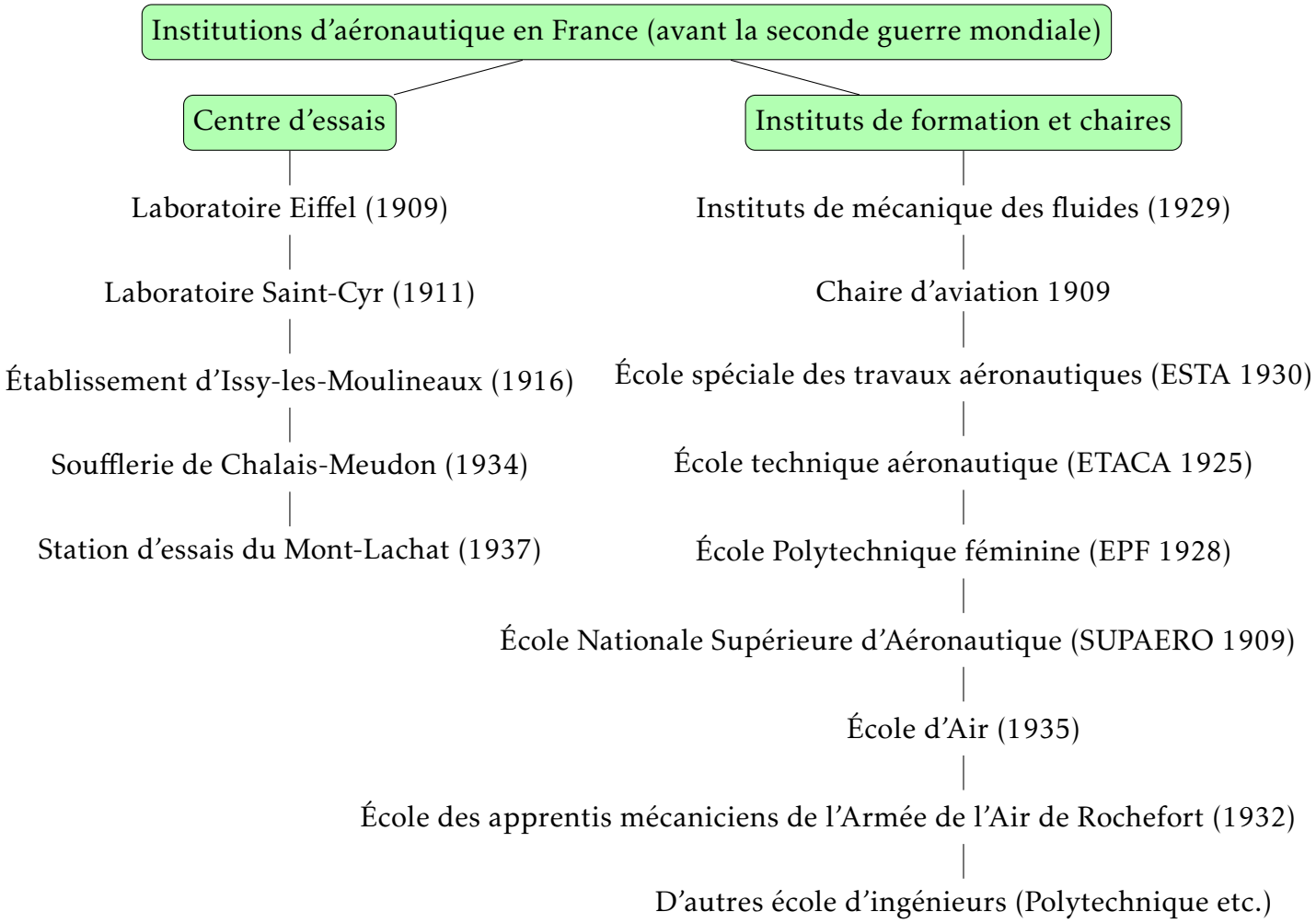


FIGURE 2.2 – Un paysage des institutions d'aéronautique existantes avant la seconde guerre mondiale et qui s'ajoute au réseau des pôles de mécanique des fluides. Cette liste qui illustre à titre d'exemple certaines institutions ne prétend pas être exhaustive.

2.1 La mécanique des fluides avant la création des IMF (1900-1923).

Cette section vise à examiner le contexte scientifique et institutionnel de la mécanique des fluides avant 1923, c'est à dire avant la création de la première chaire de mécanique des fluides à la Faculté des Sciences de Paris. Dans ce cadre, nous mettrons en évidence que des cours et des recherches en mécanique des fluides existaient déjà avant la création de ces centres, grâce aux recherches théoriques individuelles de premier plan, aux premiers instituts d'aéronautique, et aux laboratoires d'hydraulique dont les activités étaient financées par le ministère des Travaux Publics et la Société Hydrotechnique de France (SHF).

2.1.1 Une recherche théorique de la mécanique des fluides non négligeable bien qu'encore loin de l'expérimentation.

La recherche théorique au cours des vingts premières années du XXe siècle était une recherche de premier plan malgré le peut d'intérêt que les théoriciens (mathématiciens et physiciens) montraient à l'égard des aspects plus pratiques de la mécanique des fluides. Les études théoriques de ce domaine étaient loin d'être applicables soit à cause de la difficulté des sujets envisagés, soit par le type d'approche utilisé, qui avait comme priorité celle de renforcer les aspects mathématiques de la théorie à l'aide de théorèmes de l'analyse et de la mécanique classique. Par exemple, l'étude théorique de la résistance d'un fluide à l'avancement d'un corps solide -qui est à la base scientifique de la théorie des aéroplanes de l'époque - constituait l'un des sujets à la mode au cours des trente premières années. Cette étude, assez difficile à appliquer, trouvait ses fondements dans l'hydrodynamique rationnelle de Tullio Levi Civita (1873-1941) [12]. Il s'agit d'une hydrodynamique fondée sur la consolidation des principes mathématiques de la théorie et de ses théorèmes pour devenir "plus applicable" mais pas forcément en accord avec les données expérimentales [Tazzioli 2016, 283], en focalisant son attention sur les fluides parfaits et en négligeant les cas plus complexes résultant des effets de viscosité, tourbillons et variation de la densité.

Cela est, par exemple, le cas d'Henri Villat (1879-1972), qui deviendra plus tard le *patrons* de la mécanique des fluides théorique de l'entre deux-guerres [13] et

12. L'influence de Levi-Civita sur l'hydrodynamique française des trente premières années est analysée par Rossana Tazzioli. L'auteur explique comment ses travaux attirent l'attention de plusieurs spécialistes de la mécanique des fluides de l'époque comme Marcel Brillouin, Joseph Boussinesq et Henri Villat Tazzioli [2016].

13. Sur Henri Villat en tant que patron voir [Gispert et Leloup 2009]. Sur une analyse du rôle

qui réalisera en 1911 une thèse *Sur la résistance des fluides* visant à perfectionner les études de Levi-Civita sur ce sujet, grâce aussi à un intense échange de lettres entre Brillouin et Boussinesq. Ici, dans le même esprit que le mathématicien italien, il utilise une approche rigoureuse du point de vue mathématique pour développer de nouveaux principes théoriques et certaines applications [Tazzioli 2016, 260-268]. Plus précisément, le problème envisagé par Henri Villat concernait la solution au paradoxe de d'Alembert que Levi-Civita avait déduit à l'aide de l'hypothèse du sillage et les surfaces de discontinuité dans le calcul de la résistance hydrodynamique d'un corps plongé sur un fluide parfait à deux dimensions [14].
En France, ce problème attira l'attention non seulement d'Henri Villat, mais également de Marcel Brillouin (1854-1948) et Pierre Duhem (1861-1916), en donnant lieu à un échange animé entre les trois [Tazzioli 2017–07]. En effet, Marcel Brillouin montre que la surface de discontinuité doit être infinie pour éviter des valeurs négatives de la pression dans certaines régions, ce qui conduirait à un nouveau paradoxe (1911), tandis que Pierre Duhem étend ce résultat au cas de l'éspace. Sur un autre plan, la thèse d'Henri Villat reprend le problème laissé ouvert par Levi-Civita dans sa note de 1907, concernant la difficulté d'obtenir une loi de la résistance hydrodynamique à cause de l'impossibilité, d'avoir une relation mathématique générale et explicite entre une fonction arbitraire $\Omega(t)$ et la forme de l'obstacle (supposée connue), ce qui obligeait à avoir une fonction particulière $\Omega(t)$ pour chaque corps [Nastasi et Tazzioli 2006, 93-94]. Dans ce contexte, Villat, à l'aide de l'analyse complexe et la théorie de la transformation conforme, fut capable d'introduire une nouvelle fonction qui relie $\Omega(t)$ à la forme de l'obstacle et de donner l'expression de la résistance hydrodynamique pour quelques formes simples d'obstacle, rendant ainsi "plus applicable" la méthode de Levi-Civita [15].
Malgré son important résultat, il semble que son travail fut apprécié plus par les mathématiciens comme Émile Picard que par les physiciens et les ingénieurs, d'autant plus que le même Boussinesq refusa de le publier dans les CRAS [Aubin 2006, 12]. Comme dans le cas de Levi-Civita, son étude est encore trop loin du cas du fluide réel et montre une tendance encore trop faible à l'applicabilité d'une théorie.

institutionnel et scientifique d'Henri Villat dans le domaine de la mécanique des fluides du xx^{e} siècle voir [Aubin 2006].

14. Cette hypothèse consistait dans la subdivision du fluide en deux régions, intérieure et extérieure au sillage, séparées par une surface de discontinuité, laquelle se formait au début du mouvement à l'arrière ou à l'avant du solide immergé. Sur la contribution de Levi-Civita en hydrodynamique et plus en particulier sur ce problème, voir [Nastasi et Tazzioli 2006]. Ses résultats seront développés quelques années plus tard, en 1907, à l'aide de l'analyse complexe, grâce à laquelle il déduit une méthode pour calculer les composantes de la résistance hydrodynamique dans le cas d'un mouvement plan avec sillage si la forme du corps est polygonale ou curviligne [Nastasi et Tazzioli 2006, 91-95]

15. Nous revenons sur sa thèse dans le chapitre 4

Au-delà du problème de la résistance d'un fluide, nous pouvons remarquer que dans le volume sur l'hydrodynamique dans l'*Encyclopédie des sciences mathématiques pures et appliquées* rédigée par Love, Beghin, Appell et Villat en 1914, d'autres sujets abordés pendant cette période incluent des questions liées à l'étude des fluides visqueux, la théorie des ondes, les tourbillons et leurs propriétés, l'hydrodynamique de Duhem et le mouvement d'un objet sur un fluide [Love et. al. 1912–1914]. Cependant, comme pour le cas du problème de la résistance d'un fluide, ses recherches sont fortement mathématiques et s'intéressent peu à l'expérimentation. Ce manque d'intérêt pour les questions plus pratiques du domaine se manifeste aussi, dans certains cas, dans l'enseignement de la mécanique des fluides et plus en général de la mécanique. D'après Belhoste et Konstantinos, sauf quelques exceptions comme l'Institut Industriel du Nord (IDN), il n'y a pas en France de laboratoires de mécanique appliquée comparables à ceux existants en Allemagne, États-Unis et en Grande Bretagne, et ce retard ne sera progressivement comblé qu'après la guerre. Les enseignants sont restés dans la tradition des ingénieurs-savants à la française, fondée sur l'importance du rôle des mathématiques et le mépris de la pratique. A titre d'exemple, à la Faculté des Sciences, la chaire d'aéronautique de Marchis a des cours principalement théoriques qui comprennent exceptionnellement des enseignements plus pratiques [Belhoste et Kostantinos 1998, 36]. Il en va de même pour les ingénieurs des Grandes Écoles et de l'École Polytechnique [Chabert et Gilain 2014].

Sur une échelle internationale, ces théoriciens et plus en général les spécialistes de la mécanique des fluides participaient à la vie de la communauté de mécanique des fluides [16] qui commençait à se créer vers les années vingt autour des *International Congress of Applied Mechanics*(ICAM). Ces rencontres internationales sur la mécanique appliquée ont eu lieu pour la première fois à Innsbruk en 1922, [17] suite à une idée de Levi-Civita et von Kármán d'organiser une rencontre informelle sur la mécanique des fluides [18]. Le succès fut tel, que la participation à l'événement se propagea à des participants provenant d'autres secteurs de la mécanique appliquée, jusqu'à mettre en place un véritable congrès international de mécanique appliquée tous les quatre ans dans une ville différente (neutre au début). Ainsi, les ICAM offraient la meilleure solution pour présenter des résultats aux autres spécialistes de la mécanique des fluides et échanger avec eux. La participation était ouverte à tous les pays, mais la politique d'ostracisme [19] à l'égard des alle-

16. Nous revenons sur l'esprit de cette communauté dans le chapitre IV.

17. Pour faire une comparaison, les Congrès internationaux des mathématiciens (ICM) sont plus anciens. Le premier date de 1897. Sur ce sujet voir [Lehto 1998].

18. Sur l'engagement de Levi-Civita et von Kármán dans l'organisation des congrès ICAM voir [Battimelli 1996].

19. Sur la politique d'ostracisme des scientifiques voir [Pestre 2004] et [Reinbothe 2010–11–08]

mands avait certainement influé sur la participation des spécialiste français aux premiers ICAM et par conséquent sur la diffusion des leurs idées dans ce conteste international. Par exemple, la théorie de la résistance hydrodynamique de Villat était moins connue à l'étranger. Dans une lettre à Levi-Civita, Antonin Lapresle, à l'époque directeur du laboratoire Eiffel explique à Levi-Civita qu'il ne peut pas aller au congrès "sans une autorisation que j'hésite à demander actuellement" [Battimelli 1996, 59] [20].

Comme pour les mathématiciens, la normalisation des rapports des mécaniciens avec l'Allemagne débutera vers la moitié des années 1920 [Table 2.1]. La France commencera à être bien représentée dans l'International Committee des congrès à partir de 1926 (Villat, Jouguet, Hahn et Koenigs), lors de l'ICAM de Zurich.

Dans ce panorama où il semble que la mécanique des fluides théorique et les académiciens aient un rôle dominant, il ne faut néanmoins pas négliger les recherches à caractère expérimental effectuées dans les divers champs d'application existants déjà avant la création des instituts de mécanique des fluides : à titre d'exemple, nous présenterons le cas de l'hydraulique et de l'aéronautique, deux domaines qui, déjà au début du XX^{e} siècle, se servaient de la mécanique des fluides pour leurs bases scientifiques.

2.1.2 L'hydraulique au sein des instituts électroniques françaises

Dans le domaine de l'hydraulique, des liens entre enseignement, recherche et industrie peuvent être repérés de manière précoce, déjà au début du xx^{e} siècle. Par exemple, à Nancy (1900), Grenoble (1906) et Toulouse (1908) furent créés des instituts électroniques, organes d'enseignement et de recherche en étroit contact avec les industries électriques locales. Ils ne pouvaient pas se désintéresser de la production de l'énergie électrique et, par conséquent, de l'aménagement des chutes d'eau et de l'hydraulique en général. Ainsi, au sein des instituts électroniques des trois villes furent créés les premiers laboratoires d'hydraulique. Ils recevaient chaque année un crédit par le ministère des Travaux Publics affecté spécialement aux "Recherches pour la production et l'utilisation des forces hydrauliques" [21]. Entre le ministre des travaux publiques et l'Éducation nationale il y avait une collaboration qui rappelle celle entre ce dernier et le Ministre de l'Air. Un autre appui financier venait de la Société Hydrotechnique de France (SHF).

20. Les autres mathématiciens, ingénieurs et physiciens français qui ont décliné l'invitation sont : P. Painlevé, J. Hadamard, E. Borel, A. Boulanger, H. Villat, G. Eiffel, L. Marchis et P. Appell.

21. Sur l'histoire des instituts électroniques, leur genèse, les rapports avec les industries locaux, et l'appui financier du ministre des Transports Publiques voir [Birck et Grelon 2006].

Pays	1922	1924	1926	1930	1934	1938	1946
France	0	3	16	23	26	14	109
Allemagne	14	54	74	89	37	22	0
USA	0	1	5	24	18	286	114
Royaume Uni	0	23	15	20	113	34	141
Italie	5	4	6	6	2	1	19
Autriche	3	2	7	9	1	3	0
Suisse	0	1	91	6	6	1	18
Pays Bas	6	113	11	7	9	2	24
Russie	0	4	0	17	3	3	1
Suède	2	2	5	61	6	2	11
Belgique	0	2	3	5	4	0	19
.....	.....	.....	.....	.....	....	...	...
Nombre de Pays qui ont participé	8	22	23	35	26	22	27

Tableau 2.1 – Tableau des participants aux congrès ICAM de 1922 à 1946. Il s'agit d'un extrait d'un tableau contenu dans le document *IUTAM/ICTAM a short history* (1984) (auteur non précisé). Je remercie Giovanni Battimelli pour ce document.

Cette société fut fondée en 1912 et constituait l'organe technique de la Chambre Syndicale des Forces Hydrauliques, un patronat qui comprenait les entrepreneurs intéressés par l'installation et l'exploitation des chutes d'eau pour la production électrique. Elle était composée d'un comité d'administration permettant d'avoir un budget à travers la cotisation des adhérents et d'un comité technique constitué par des savants et des ingénieurs recrutés par l'industrie, l'université et l'administration. En d'autre termes, il s'agit d'un organisme technique à la disposition des entrepreneurs destiné à créer un pont entre université et industrie autour du domaine de la recherche et l'enseignement de l'hydraulique [22]. Ainsi, grâce aux financements du ministre des Travaux Publiques, Charles Camichel fondera en 1913 un laboratoire d'hydraulique dans les locaux de l'institut électrotechnique de Toulouse (IET), avant de devenir directeur de l'institut de mécanique des fluides, conçu une dizaine d'années plus tard [23]. Les activités de ce laboratoire

22. Sur l'histoire de la SHF voir [Banal et. al. 2002–08]

23. Le physicien Charles Camichel (1871-1966) fut le fondateur de l'IET au sein duquel il créa le laboratoire d'hydraulique. Il est convaincu de l'importance de renforcer les liens entre industrie et université, encore plus après son expérience lilloise. En effet, avant d'obtenir un poste de maitre de conférence à Toulouse, il était maitre de conférence à la Faculté des Sciences de Lille de 1895 à 1900. Ici, il continua les enseignements de physique industrielle d'un cours institué par Bernard Brunhes en 1894 à l'institut de physique de Lille. Sur la base du cours de Brunhes, Camichel créera en 1897 l'institut de Mécanique appliquée et de physique industrielle, qui sera à l'origine du futur institut électrotechnique de Lille. Sur sa contribution scientifique voir [Charru 2017–08] et son

concernaient notamment les coups de bélier dans les conduites forcées et l'hydraulique fluviale, activités qui étaient en connexion avec les usines hydroélectriques dans les Pyrénées [Charru 2017–08]. A l'institut électrotechnique de Grenoble, le premier cours d'hydraulique fut inauguré en 1906 par l'ingénieur Georges Routin (1871-1937), spécialisé dans l'étude des turbines et des pompes. En 1923, ce cours s'ouvrira aux ingénieurs et industriels lors de l'installation à Beauvert d'un laboratoire d'hydraulique (*le laboratoire dauphinois d'hydraulique*) créé par la SHF [24] et en échange constant avec l'entreprise Neyrpic fabricant de grands équipements hydrauliques y compris les turbines [25]. Auprès de l'institut électrotechnique de Nancy, l'état embryonnaire du laboratoire d'hydraulique fut le cours de machines hydrauliques professé par l'ingénieur et membre de la SHF, Ernest Hahn [26] depuis 1906. Ce laboratoire avait été sélectionné, avec ceux de Grenoble et Toulouse, pour contribuer à un programme de recherche national dont il recevait des subventions par la SHF pour développer et moderniser ses installations afin d'étudier des questions liées aux pompes, turbines et moteurs hydrauliques [27].

Le domaine de l'hydraulique, en échange permanent avec les entreprises locales, semble donc être bien consolidé chez les instituts électrotechniques, en recevant des subventions par le ministère des Travaux Publiques, la SHF et d'autres institutions intéressées au domaine. Cependant, même si la mécanique des fluides concerne aussi bien les aspects hydrauliques qu'aéronautiques, c'est le ministre de l'Air et son but de rattraper le retard national de l'aéronautique qui pousse à la création des chaires et des instituts de mécanique des fluides. Sur le plan scientifique, cela peut nous inciter à questionner si le domaine de l'hydraulique était frappé ou non par les lacunes de la mécanique des fluides -décrites ci-dessus- dans la même mesure que l'aéronautique. Serge Benoit, à propos du domaine de l'hydrotechnique montre comment déjà à partir du début du xx^{e} siècle des hydrauliciens comme Auguste Rateau (1863-1930) et André Tenot (1898-1978) "mettaient en discussion l'esprit et les méthodes des institutions de fondation qui s'opposent à celles étrangères". Ils regrettent en particulier qu'il ne fut pas donné une large place à la pratique de l'expérimentation dans l'enseignement

dossier conservé aux archives de l'Académie des sciences.

24. En vue de renforcer son action dans le domaine de la recherche, la SHF créa aussi un laboratoire d'hydraulique fluviale à Metz en 1928 pour l'aménagement du Rhin et en 1941 le Service d'Études Générales de Statistique et Hydrologie.

25. Sur le laboratoire d'hydraulique de Beauvert à Grenoble, voir [Hager 2016–10].

26. Ernest Hahn (1876-1948) fut un ingénieur mécanique suisse qui était assistant à la Swiss Federal Insitute of Technology d'Aurel Stodola, un expert de renommé mondiale en turbomachines et machines thermiques (Albert Einstein fut un de ses élèves). Les cours et les recherches de Hahn concernaient les méthodes expérimentales pour machines thermiques et hydrauliques. Sur son activité à Nancy voir [Hahn et Hager 2003–08].

27. [Birck et Grelon 2006, 51]

dispensé aux futurs ingénieurs [Benoit 1998, 122]. Sur un plan plus institutionnel, les hydrauliciens possédaient déjà des cours de mécanique des fluides en fonction de leurs recherches sur l'eau et il était capable de satisfaire la contribution locale des industriels. C'est la raison pour laquelle l'Université de Toulouse a refusé dans un premier temps de créer l'institut de mécanique des fluides [Idrac 1996, 191] [28].

En général, l'installation d'un pôle de mécanique des fluides du ministre de l'Air dans les villes pourvues d'un centre d'hydraulique important, a permis de créer une recherche d'aérodynamique parallèle à celle conduite auprès des laboratoires d'hydraulique. Ainsi, l'équipe de Camichel de Toulouse effectuait des essais en soufflerie à côté des études en hydraulique des fleuves ainsi que sur les tourbillons et les sillages, bien que l'orientation de l'institut fût essentiellement hydraulicienne. Grenoble, bien que seulement après la seconde guerre mondiale s'occupera d'aérodynamique et de supersonique en plus de l'hydraulique. Sa soufflerie supersonique fût fabriquée en 1946, grâce à la collaboration entre le Ministre de l'Air et l'Université. En revanche, à Nancy nous avons une situation inverse. Depuis la fin du XIX^{e} siècle, la ville occupait une place très importante dans les sciences appliquées qui s'appuyaient sur les contacts avec l'Allemagne et avec les industries. Déjà avant la guerre, outre son laboratoire d'hydraulique, elle disposait d'un pôle d'aéronautique représenté par l'Institut d'Aérodynamique et Météorologie (1910) et la Société des amis de l'Aviation (1914). Au contraire des autres villes mentionnées, Nancy ne renforcera pas son domaine de sciences appliquées après la guerre mais deviendra progressivement un centre de mathématiques pures. En effet, aucune chaire de mécanique des fluides ne fut mise à disposition par le ministre de l'Air en 1929 et l'institut d'Aérodynamique et Météorologie s'écroulera aux alentours des années vingt. Il en va de même pour le laboratoire d'hydraulique. Jusque dans les années vingt, ce laboratoire était très dynamique grâce aux travaux de Hahn, lequel développa une courbe rhéologique pour résoudre des problèmes sur l'écoulement de l'eau et la formation des tourbillons derrière les turbines électriques. Quand Hahn rentrera en Suisse à la fin des années 1930, son laboratoire d'hydraulique perdra progressivement sa force. [29]

Cependant, nous sommes bien loin d'affirmer que les questions hydrauliques sont abordées dans un laboratoire et celles d'aéronautique dans un autre. Les programmes de recherche et de formation des instituts de mécanique des fluides

28. En 1923, il y a aussi un tentative de la part de Toulouse de créer un institut général d'hydraulique et hydrologie capable d'associer tous les établissements susceptible de s'intéresser aux thèmes de l'eau (chimie, institut agricole, institut électrotechnique et hydrologie). Cependant, ce projet sera contesté par les autres établissements (juristes et littéraires) qui estiment que les instituts présents sont suffisants [Grelon et Grossetti 1996, 227]

29. Sur le cas de Nancy voir [Rollet et Nabonnand 2014].

prévoyaient également une étude plus générale concernant les fluides, l'eau ainsi que des essais sur les pompes et les turbines. Dans certains cas, ils étaient même doués d'une Station d'essais hydrauliques. A plus forte raison, il faut mentionner le cas de Toulouse, où le ministre de l'Air avait décidé de créer un institut non pas pour la présence d'une industrie aéronautique locale mais pour bénéficier des acquis de la recherche du laboratoire d'hydraulique [Grelon et Grossetti 1996].

En ce qui concerne Lille, la section de mécanique de l'institut électrotechnique n'a pas eu une forte orientation vers l'hydraulique comme à Grenoble, Toulouse et Nancy. Une chaire d'hydrotechnique sera créée seulement en 1937. Cependant, la mécanique des fluides et l'hydraulique existaient à Lille déjà avant la création de l'IMFL. Citons, à titre d'exemple, le cas de Joseph Boussinesq, qui avait publié son important ouvrage *Essais sur la théorie des eaux courants* (1877) sur les canaux ouverts [30] pendant sa période d'enseignement à la Faculté des Sciences de Lille et à l'IDN, à savoir de 1872 à 1886. Toujours à Lille ses disciples, le mathématicien Auguste Boulanger (1866-1923) [31] et l'ingénieur Alfred Flamant (1839-1915) poursuivaient leurs recherches d'hydraulique. Enfin, ajoutons aussi Paul Painlevé, chargé de cours de mécanique rationnelle à Lille de 1887 à 1892, et la personnalité controversée de Pierre Duhem, qui fut maître de conférence de physique à Lille de 1887 à 1893. C'est ici que Duhem jette les bases de sa théorie hydrodynamique construite à partir du potentiel thermodynamique et sous des hypothèses plus générales qui prennent en compte la compressibilité d'un fluide, à l'époque encore très peu étudiée par les physiciens et les mathématiciens. Cependant, aucun des savants mentionnés n'avait une chaire d'hydraulique ou ne faisait partie d'un laboratoire d'hydraulique. Ils professaient des cours à l'IDN et/ou à la Faculté des Sciences, en enseignant la mécanique et les mathématiques (Painlevé, Boulanger et Boussinesq), la physique (Duhem) ou des disciplines concernant les constructions civiles et la physique industrielle (Flament).

2.1.3 L'émergence de l'Aéronautique.

En France l'institutionnalisation de l'aéronautique est assez décalée par rapport à celle de la mécanique des fluides et date du début du xx^{e} siècle. [32] La naissance des premiers commissions, écoles et laboratoires d'aéronautique furent encouragée

30. Sur une analyse de son ouvrage voir [Darrigol 2017–07]

31. Son *Hydraulique Générale* (1909) lui vaut un prix et s'insère dans la bibliothèque de mécanique appliquée dirigée par Maurice d'Ocagne.

32. Dans l'histoire de l'aviation, la période 1900-1914 est souvent connue comme la période "des pionniers du plus lourd que l'air". Ici, entre un record et l'autre, plusieurs pionniers européens et américains ont effectué leurs premiers vols à moteurs.

non seulement par les pionniers de l'aviation [33] mais encore par l'intérêt croissant des savants, des ingénieurs et des militaires à l'égard de ce domaine : leur but était de développer la science aéronautique et de la faire sortir de son empirisme. Par exemple, lorsque les frères Wright dessinèrent la structure des ailes de leur avion, ils ne connaissaient pas encore la répartition des forces aérodynamiques sur celles-ci, notamment la distribution de la pression sur l'intrados et l'extrados afin d'avoir une portance plus forte [Carpentier 2011]. En effet, les premières étapes de l'aviation sont plus techniques que scientifiques : construction des premiers appareils en vol et moteurs, techniques nécessaires pour la stabilité et le pilotage de l'aéronef (décollage, roulis, empennage, centrage etc.), et choix des matériaux qui permettent une meilleure résistance structurale aux rafales et, plus tard, au combat.

Avant tout, déjà en 1902, l'Académie des Sciences avait compris l'importance de ce domaine en constituant une *Commission de l'aéronautique*, comprenant une douzaine de scientifiques notamment physiciens, chimistes, mathématiciens, ingénieurs, astronomes etc. [34]. Toujours dans le milieu académique, l'un des disciples de Pierre Duhem, Lucien Marchis, [35] devint le premier titulaire de la chaire d'aéronautique créée à la Sorbonne par le marchand d'armes Bazil Zaharoff [36]. Chez les

33. Il s'agit de pionniers appartenant à différents milieux sociaux et qui contribuent à développer ce domaine, encore dans un état embryonnaire au début du xx^{e} siècle. Nous pouvons mentionner par exemple Charles Renard, Ferdinand Feber, les frères Voisin, les frères Farman, Louis Blériot et le brésilien Alberto Santos-Dumont, parisien d'adoption. Pour leurs biographies et contributions à l'aviation voir par exemple [Carpentier 2011]

34. Sur cette commission voir le dossier DG47 conservé aux archives de l'Académie des Sciences.

35. Lucien Marchis (1863-1941) fut un physicien élève de Pierre Duhem. Sa thèse *Les modifications permanentes du verre et le déplacement du zéro des thermomètres* (1898) ainsi que ses premiers travaux sont profondément influencés par Duhem et ils appartiennent à la mécanique chimique, notamment à l'ensemble d'études sur les déformations permanentes de verres. Une correspondance scientifique très abondante entre les deux montre un étudiant très dévoué à son maître. Maître de conférence à la Faculté des Sciences de Bordeaux, il entreprend en 1899 des recherches à caractère plus industriel et en collaboration avec un groupe d'ingénieurs. Dans ce contexte, il organise des cours pour les ingénieurs à la Faculté des Sciences et il étudie des moteurs d'automobile, moteurs à vapeur, à courant continu et leur alimentation ; il fait également des recherches sur l'échauffement industriel et sur la statique et la dynamique de la navigation aérienne de dirigeables et ballons sphériques. En peu de mots, il met ses connaissances scientifiques au service de l'industrie et de la pratique, notamment la thermodynamique, la physique et la chimie. A partir de 1910, il se consacrera presque exclusivement à l'aérodynamique et ses applications aux avions.

36. Passionné par l'aviation, lié à d'importantes personnalités politiques françaises comme Georges Clemenceau, et vendeur d'armes à diverses nations y compris la France, Bazil Zaharoff avait financé une chaire d'aviation pas seulement à l'université de Paris mais aussi à l'Imperial College à Londres et à l'Université d'État de Saint-Pétersbourg. C'est pour cette raison qu'il fut promu en 1913 officier de la Légion d'honneur. Pour ses rapports avec la France, on consultera son dossier dans la base de données Léonore.

ingénieurs, outre à l'École Polytechnique et à l'École des Arts et Métiers, l'enseignement et la recherche des disciplines autour de l'aéronautique furent confiées à une nouvelle école, l'École supérieure d'Aéronautique créée en 1909 par le colonel Jean-Baptiste Roche dans le but de former des ingénieurs pour l'industrie aéronautique française. Dans le domaine plus spécifique de l'aérodynamique expérimentale, deux centres furent créés : le laboratoire Eiffel et l'Institut Aérotechnique de Saint Cyr [37].

Dans son laboratoire du Champ-de-Mars, Gustave Eiffel (1832-1923) avait entrepris à partir de 1903 l'établissement des données sur la résistance de l'air à l'aide de son appareil de chute. Plus tard, en 1909, il construira dans son Laboratoire du Champs de Mars sa première soufflerie destinée aux mesures aérodynamiques de petits modèles de profils d'ailes, d'aéroplanes ou d'hélices. Dans son deuxième laboratoire sur la rue Boileau à Auteuil (1912) il réalisera une soufflerie avec une veine de 2 m de diamètre et 30-40 m/s de vitesse, équipée d'un convergent à l'entrée et d'un divergent (diffuseur) à la sortie de la veine, ce qui permet d'utiliser un ventilateur de 50 CV au lieu de 400 CV, en économisant une partie importante de la puissance : ce type de soufflerie à circuit ouvert prendra le nom de *Soufflerie Eiffel* et sera plus tard un modèle utilisé dans le monde entier. La création de l'Institut Aéronautique de Saint-Cyr par l'Université de Paris fut une initiative du mécène de l'aviation française Henry Deutsch de la Meurthe, par ailleurs fondateur de l'Aéro-Club de France en 1898. Ici, l'équipe de Charles Maurain (1871-1967) utilisait des méthodes de mesure applicables à des objets de grandes dimensions tels que les avions de l'époque. En effet, elle disposait d'un chariot aérodynamique mobile sur voie ferrée pour étudier l'action de l'air sur un objet (surface d'aviation, aéroplanes, hélices etc.) en déplaçant cet objet dans l'air [38]. De plus, la première guerre mondiale vit le début de l'utilisation intensive de l'aviation, d'abord comme moyen de reconnaissance puis comme arme qui se développe de manière exponentielle à travers la production en série et le perfectionnement des pilotes. Son industrie avait produit de 1914 à 1918 50 000 avions, 16 000 pilotes et 2 000 observateurs [Carpentier 2011, 379].

C'est après la guerre que les choses changent. En effet, l'arrêt brutal de la construction militaire et le retour aux constructions civiles avait conduit à un processus de reconversion dont les mauvaises stratégies de marché furent la cause du blocage de l'industrie aéronautique [Weber 2008, 21]. Les appareils à disposition montraient une grande fiabilité et sécurité mais ils restaient totalement

37. Sur le laboratoire Eiffel, l'Institut Aéronautique de Saint Cyr, et l'aérodynamique expérimentale à Paris pendant les trente premières années voir [Fontanon 1998]

38. Au contraire, Eiffel utilisait la soufflerie pour effectuer ses essais sur un objet fixé (un modèle réduit de l'objet à étudié) soumis à l'action d'un courant d'air

inadaptés pour les besoins civils et le transport commercial. L'industrie française, qui avait un poids international remarquable en 1918 grâce à ses avions produits par 185 000 personnes, tomba à un effectif de 3 700 personnes en 1921 en perdant peu à peu tous les records qu'elle détenait au début des années 1920. Dans un paysage où le Royaume Uni, l'Allemagne, et les États-Unis et l'Italie modernisaient rapidement l'industrie aérotechnique, la France accumulait progressivement son retard dans le délai de production : les modèles retenus en 1923 n'étaient délivrés qu'en 1929 [Carpentier 2011, 390].

Au-delà des fautes de stratégies industrielles, ce retard semble être également scientifique. Ceci était encore plus évident pendant les années vingt où le contexte d'une aéronautique en déclin était aggravé par l'évolution scientifique même du domaine, qui posait des questions toujours plus complexes en aérodynamique. C'est dans ce contexte que les acteurs autour du domaine de l'aéronautique décident de capitaliser sur ce prétendu retard pour avancer leurs propres solutions visant à la création de chaires et instituts intéressant la mécanique des fluides. Nous verrons, dans les sections qui suivent le cas de Lille.

2.2 L'institutionnalisation de la mécanique des fluides à Lille.

A l'origine de son projet, le ministre de l'Air n'avait pas opté pour Lille de peur qu'elle puisse être trop près de la frontière. C'est le doyen de la faculté des sciences Albert Maige qui réussit à le convaincre, à travers des tableaux de données visant à montrer que Lille était une bonne candidate pour construire un institut de mécanique des fluides [39] grâce au nombre de ses enseignements et étudiants :

> Le point de départ se trouve dans une démarche de M. Villat qui en 1928 écrivit à M. Kampé de Fériet pour lui signaler l'intention du Ministère de l'Air de créer des chaires de Mécanique des fluides dans certaines universités et intervint auprès de M. Laurent Eynac, Ministère de l'Air, pour que la Faculté des Sciences de Lille bénéficie de l'une de ces chaires. [...] C'est alors que sur la demande de M. Villat, je [Albert Maige] lui envoyais un tableau qui faisait la comparaison numérique dans les principales Universités française : Lille, Marseille, Nancy, Toulouse, Bordeaux, des chaires et des maîtrises de mathématiques, des candidats à l'Agrégation de Mathématiques et de Physique, des certificats de licence de mathématiques et des candidats admis, etc.

39. Assemblée de la Faculté des Sciences de l'Université de Lille, tenue le 16 mai 1934 [Archives de l'Académie des Sciences, Fonds Henri Villat].

> et qui montrait nettement que la Faculté des Sciences était la mieux désignée par le nombre de ses enseignements et de ses étudiants. "

En premier lieu, en partageant le point de vue d'Albert Maige, cette partie se focalise sur les raisons pour lesquelles Lille a été désignée en définitive par le ministre de l'Air. Puis, nous nous concentrerons sur la fondation de l'institut, implanté d'abord dans les locaux de l'Institut de Physique, et ensuite dans le nouveau bâtiment qui est aujourd'hui le siège de l'ONERA, dans le centre de Lille. Enfin, le dernier paragraphe essaye de détecter les mécanismes qui ont permis à Kampé de Fériet, qui n'est ni normalien ni polytechnicien, de devenir directeur de l'IMFL à l'âge de 34 ans. En d'autres termes, cette section est consacrée à la période de la naissance de l'institut et à l'élection de son directeur.

2.2.1 Lille et son attention vers les sciences appliquées

A Lille, ville industrielle et dynamique du point de vue universitaire, les premières formes de collaboration entre enseignement et industrie remontent à une période antérieure à celle de la création de l'université de Lille (1896). En 1825, à l'École de Chimie (financée par la Mairie à l'époque), le professeur de chimie Frédéric Kuhlmann (1803-1881) avait réalisé une petite industrie (les établissements Kuhlmann), où les élèves pouvaient appliquer leurs recherches concernant notamment la production d'engrais, de colorants et super-phosphates à vendre aux producteurs de betteraves [40].

Pendant le XIX^e siècle bien que Lille est déjà une cité industrielle, le pouvoir intellectuel était encore concentré à Douai, siège de la Faculté des Lettres et de l'Académie. A Lille il n'y avait qu'un collège communal. La rivalité entre les deux villes, la nécessité de disposer du personnel technique pour développer son milieu économique et industriel, le soutien de la Société des Sciences, de l'Agriculture et des Arts (1785) peuvent être des facteurs explicatifs d'une mise en place par la mairie de Lille d'un programme d'enseignement surtout au niveau scientifique, ce qui conduisit à la naissance de l'École des Arts et Métiers (1837), la Faculté des Sciences (1854) [Figure 2.3], la Faculté mixte de Médecine et Pharmacie (1874), le déplacement de la Faculté des Lettres et de Droit de Douai à Lille (1887), et conséquemment à la création de l'Université de Lille en 1896. Simultanément, une autre rivalité se présente, représentée par le mouvements catholiques qui financent la réalisa-

FIGURE 2.3 – La Faculté des Sciences de Lille, [Archives de l'ONERA Lille].

40. Pour l'histoire de l'Université de Lille voir [Condette 1997]. Pour la Faculté des Sciences, voir la précieuse reconstruction réalisé par l'ASA, consultable sur le site http://asa3.univ-lille1.fr. Pour les mathématiciens de la Faculté des Sciences de Lille voir [Pourprix 2009] ; pour une lecture générale de l'histoire de Lille qui montre son dynamisme industriel voir [Pierrard 1967].

tion de l'Université Catholique (1875). En outre, cette dynamique du contexte constitua un terrain favorable au développement de plusieurs instituts de sciences appliquées (publics et privés), entre autres l'institut de mécanique appliquée et de physique industrielle (1897) - qui donnera naissance à l'Institut l'Électrotechnique (1912), l'Institut de Chimie (1894), et l'Institut Industriel du Nord (1872). Cette école d'ingénieurs fut fondée en englobant la préexistante école des Arts et Métiers (1837), née dans le but de disposer d'enseignements théoriques, techniques et pratiques visant à créer un personnel qualifié pour développer le domaine commercial, industriel et agricole de la région (construction de machines, exploitation de mines, textile, chimie industrielle et agricole).

Perturbée par la guerre 1914-1918, Lille doit concentrer tous ses efforts vers la reconstruction de son université, ce qui se montre compliqué à cause de l'occupation allemande qu'elle a subie, et qui a vu plusieurs instituts être brûlés. C'est là qu'intervient le rôle institutionnel d'Albert Châtelet. Après sa mobilisation à la Commission de Gâvre, il devint maître de conférence à la Faculté des Sciences de Lille et s'engagea lourdement dans les tâches administratives et la reconstruction de l'université, premièrement en tant que doyen jusqu'en 1924 et puis en tant que recteur. Il contribua à restaurer et développer l'université "par la création de services adaptés aux besoins de la science et de l'industrie, tant régionaux que nationaux et par la construction et l'aménagement des bâtiments nécessaires à ces services "[41]. Sous son impulsion il n'y a pas seulement un renforcement des instituts déjà existants et une extension de ses bâtiments mais également la création d'autres instituts de sciences appliquées :

- Institut d'Electromagnétique 1924 (il remplace l'Institut Électrotechnique)
- Institut de Mécanique des Fluides 1929
- Institut Agricole 1931
- Institut de Radioélectricité 1934
- Institut de la Houille 1931
- Institut de Mécanique Appliquée (Observatoire de Lille et laboratoire de mécanique) 1934
- Institut d'essais de Semences et de Recherches agricoles 1929
- Institut de Chimie Appliquée 1929
- Laboratoire du Textile

Dans ce cadre, la faculté des sciences demandait au Conseil Général du Nord de l'aider à poursuivre un "programme d'armement industriel" interrompu par la guerre, qui "comprend dans tous les domaines une entente étroite avec l'indus-

41. Notice sur les titres et travaux scientifique de Châtelet, archives académie des sciences (1953), reproduit dans [Goldstein 2009, 165]. L'auteur fait une analyse de sa position institutionnelle et sa contribution à la théorie des nombres pendant l'entre-deux-guerres.

trie régionale", et cette entente sera "sous la forme de l'organisation d'un service d'essais (électriques, électromécaniques, métallurgiques, combustibles, etc.) et de recherches" [42], de manière à ce que la collaboration des industriels et de la région permettent à la recherche universitaire de faire face à la crise de 1929 et survivre au moyen de leurs subventions locales.

Sans doute, cette attention que la ville montrait pour les sciences appliquées créait un milieu favorable pour la création d'un institut de mécanique des fluides. De plus, d'un côté elle était entourée d'importantes industries intéressant l'aéronautique ; de l'autre côté elle possédait déjà à partir du début du xx^{e} siècle un petit centre de formation aéronautique représenté par l'IDN. Plus précisément, cet institut organisait les premiers cours d'aéronautique en 1910, d'abord comme conférences puis comme des véritables cours [43].

2.2.2 Les origines de l'IMFL à l'Institut de Physique (1929-1933)

La négociation entre le ministre de l'Air et l'Université de Lille n'a pas été difficile. Le programme national, qui prévoyait -comme dans les autres instituts de province- des subventions locales, ne présentait pas des incompatibilités avec les exigences de l'économie locale comme à Toulouse, dont le laboratoire d'hydraulique représentait déjà très bien la contribution locale. L'IDN, qui dispensait des cours d'aérodynamique et aéronautique déjà à partir du xx^{e} siècle, ne semble pas s'opposer à la création d'un institut de mécanique des fluides. Au contraire, les deux instituts instaureront bientôt une collaboration comme nous le verrons dans la section suivante.

Le recteur de l'Université de Lille Albert Châtelet et le doyen de la Faculté des Sciences Albert Maige furent les premiers à répondre favorablement à l'appel du ministre de l'Air en province [44]. La première étape de la création de l'IMFL date du 22 mai 1929, lorsque le ministre de l'Air envoie aux recteurs des universités de Lille, Marseille et Toulouse sa circulaire proposant un centre de mécanique des fluides sur le modèle du pôle de mécanique des fluides déjà créé à Paris en 1924 [45]. Dans ce document, le ministre suggérait, pour une période de preuve de

42. Discours du doyen de la Faculté des Sciences, Annales de l'Université de Lille 1928-1929 [Archives de l'ASA].

43. *L'aéronautique lilloise 1902-1939 Histoire et prospective des Centraliens de Lille*, document fourni par M. Frédéric Rousseau, membre de l'Association des Centraliens de Lille. Nous profitons pour le remercier pour les précieux renseignements tournant autour de l'aéronautique à l'IDN.

44. Allocution prononcée par A. Châtelet pendant la cérémonie de la pose de la première pierre de l'Institut, 23 juin 1932 [Archives de l'ONERA Lille].

45. Circulaire du ministre de l'Air, 22 mai 1929, [Archives de l'ONERA Lille].

5 ans, l'établissement d'une chaire de mécanique des fluides qui ira constituer "l'embryon d'un centre autonome susceptible d'atteindre un développement plus considérable, si son activité, ses résultats et l'intérêt que leur porteront l'industrie et les pouvoirs locaux justifient par la suite qu'il leur soit accordé les moyens suffisants pour atteindre une activité complètement décentralisée ". Ce centre sera à réaliser "par des créations d'universités pour qu'ils puissent ultérieurement acquérir la personnalité civile et jouir dans leur organisation de la souplesse que ne peuvent comporter les créations d'État". De plus "ils doivent dès le début être organisés pour faire une place très importante à l'enseignement expérimental, et les moyens correspondants doivent leur être assurés par les contributions locales ". Le ministre de l'Air se chargera de verser des subventions annuels à l'université pour la création d'une chaire et d'une maîtrise de conférence. Si les résultats sont positifs à la fin de cette période, le ministre de l'Air assurera des subventions spéciales visant à "transformer ce premier embryon en un institut solidement organisé et susceptible d'avoir une activité complètement décentralisée et suffisamment féconde ".

A Lille, la faculté des sciences accepte et réalise immédiatement un avant-projet de réponse au ministère de l'Air, en précisant "comment elle conçoit l'organisation du service de la mécanique des fluides dans le cas où la faculté deviendrait l'un des centres importants de cet enseignement prévus par la circulaire". En premier lieu, d'après la Faculté, la chaire devra comprendre :

- Un professeur de la faculté des sciences, notamment un mathématicien, qui se chargera de l'enseignement théorique de la mécanique des fluides.
- Un chargé de conférences, notamment un physicien qui se chargera de l'enseignement expérimental de la mécanique des fluides et des travaux pratiques.
- Un assistant-ingénieur

Quant au professeur de la faculté des sciences, elle n'hésite pas à designer Kampé de Fériet :

> "Or la Faculté des sciences des Sciences de Lille possède parmi ses maîtres un mathématicien qui s'est distingué déjà par ses recherches d'hydrodynamique et qui d' autre part a donné des preuves de ses aptitudes à la solution de questions pratiques en imaginant en collaboration avec M. Foex de Strasbourg un appareil adopté par la Marine pour la mesure de la vitesse initiale des projectiles. La Faculté propose que la chaire de Mécanique des fluides soit confiée à ce professeur".

Les cours devront se dérouler soit à l'Institut de Physique, soit à l'Institut d'électromagnétique, lequel mettra à disposition ses appareils pour les travaux pratiques.

Le ministre de l'Air approuve les propositions de la Faculté des Sciences [46], en ajoutant que l'assistant ingénieur devra poursuivre des "recherches expérimentales intéressant l'aéronautique en vue du doctorat ou du diplôme d'ingénieur-docteur". Les sujets d'enseignement devront porter sur la mécanique des fluides théorique, celle expérimentale et l'aérodynamique appliquée à l'Aviation. De plus, le programme de Licence sera le même qu'à Paris et dans les autres facultés de Province avec lesquelles le ministre a entrepris une collaboration. Afin d'étudier la création de l'institut de mécanique des fluides et son statut, la Faculté des Sciences décide ensuite de nommer une commission composée d'Albert Châtelet (recteur de l'Université de Lille), Albert Maige (doyen de la la Faculté de Sciences), Marcel Pauthenier (Institut de Physique), Georges Chaudron (directeur de l'institut de chimie appliquée), René Swingendauw (directeur de l'Institut électromécanique), et Kampé de Fériet [47].

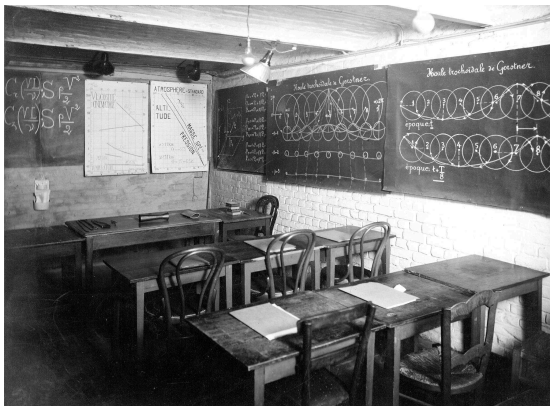
Suite à ces échanges entre l'Université de Lille et le ministre de l'Air, c'est le 14 octobre 1929 [48] que le conseil de la Faculté des Sciences accepte à l'unanimité les propositions du ministre de l'Air et il décide que la nouvelle chaire fonctionnera à partir de la rentrée, précisément le 1er novembre 1929. L'institut de mécanique des fluides sera créé officiellement par un décret du 26 mars 1930 approuvant une délibération sur Conseil de l'Université du 21 janvier 1930 [49]. Outre les subventions du ministre de l'Air [50], du milieu industriel et d'autres départements de l'université comme le laboratoire d'hydrologie, une subventionne annuelle de 10.000 francs pendant 5 ans sera demandée à l'université, suivie par une autre subvention de la faculté des sciences du montant des droits des travaux pratiques des élèves de l'institut, et un autre crédit par le Conseil Général du Nord (104 000 francs) auquel s'ajouteront d'autres subventions futures.

Suite à ces accord, le recteur nommera Kampé de Fériet directeur de l'institut le 1ernovembre 1929, sur la proposition du conseil de la Faculté des Sciences. A côté de lui, le physicien André Martinot Lagarde assurera la partie expérimentale

46. Le ministre de l'Air au recteur, 18 septembre 1929, [Archives de l'ONERA Lille].
47. Rapport de la commission de la Faculté des Sciences datant du 19 juin 1929 [Archives de l'ONERA Lille].
48. Extrait du Registre des Délibérations, séance du 14 octobre 1929 [Archives de l'ONERA Lille].
49. Conseil de l'Université, séance du 21 janvier 1930 [Archives Départemental du Nord, 2T 640].
50. Initialement, le ministre de l'Air financera 70 000 francs annuelles pour chaque instituts de province. Concernant les chaires des universités de province, le financement annuel comprendra 18 000 francs pour payer les assistants et 6000 francs pour la recherche [Mounier-Kuhn 1996] ; pour la création de la chaire de mécanique des fluides à Paris 80000 francs versé par le Service Technique de l'Aéronautique [Fontanon 2017].

en tant que chef de travaux et chargé de cours et de conférences de Mécanique des fluides ; quant à l'assistant, ce poste sera attribué à Henri Guillemet, un jeune ingénieur qui devra poursuivre pour cinq ans des recherches expérimentales intéressant l'aéronautique, en vue du doctorat ou du diplôme [51]. L'institut de mécanique des fluides ouvrira ses portes aux étudiants le 18 novembre 1929. Pendant les cinq premières années l'enseignement et la recherche se dérouleront dans les locaux de l'institut de physique et de l'institut électromécanique [Figure 2.4].

(a) Laboratoire



(b) Salle de classe

FIGURE 2.4 – Locaux de l'IMFL dans les sous-sols de l'Institut de Physique [Archives de l'ONERA Lille].

2.2.3 Le nouveau bâtiment du boulevard Paul Painlevé

Au fil du temps, les locaux de l'institut de physique deviennent toujours plus petits pour accueillir à la fois les élèves et l'outillage scientifique nécessaire pour

51. Le règlement intérieur de l'Institut est donnée en annexe (cf. annexe B)

les recherches des doctorants. De plus, outre le problème des locaux, il fallait créer d'autres appareils et étendre les recherches :

> "Le local que nous prête actuellement l'Institut de Physique, - et que ses propres besoins le pressent d'ailleurs de nous reprendre au plus tôt- ne nous ouvre aucune perspective d'avenir, - Ne serait-t-il pas à la fois ridicule et navrant d'attirer chez nous élèves et chercheurs, si nous ne pouvons leur donner la place strictement indispensable à leur instrument de travail ?" [52]

En effet, Martinot Lagarde, pour son étude sur les écoulements autour d'ailes d'avions, n'a pu réaliser qu'une petite soufflerie avec une chambre d'expériences à 20x20 cm et avec une vitesse de 30 m/s. Guillemet, pour sa thèse sur la résistance d'un corps solide en mouvement accéléré dans un fluide, a fabriqué un modèle réduit du canal hydrodynamique d'une longueur 7,60 m, une largeur de 1 m et une profondeur de 0,50 m. L'obstacle est mis sur un chariot en mouvement qui l'entraîne sur le fluide ; vers le milieu du canal le fond est remplacé par des glaces qui permettent l'enregistrement photographique du fluide autour de l'obstacle.

Kampé de Fériet est convaincu de l'importance d'un nouveau bâtiment et il s'engage pour sa construction. Il demande à M. Delannoy, l'architecte de l'université, d'esquisser deux projets de bâtiment pour avoir une idée de leurs besoins :

1. Le premier projet consiste dans l'agrandissement de l'Institut de Physique avec une extension de 714 mètres carrés, estimé à 1.978.460 francs.
2. Édification d'un bâtiment entre les portes de Valenciennes et de Douai, à coté du futur IDN et du futur camp d'aviation de Ronchin. La surface du bâtiment estimée est 1 035 mètres carrés pour un prix de 2.242.955 francs [53].

Ainsi, le conseil de l'université décide d'approuver le deuxième plan de construction de Delannoy avec quelques modifications. Plus précisément, le nouveau bâtiment sera édifié dans un terrain plus grand (2.000 mètres carrés) et au voisinage de la Porte de Valenciennes, terrain qui sera offert par la maire de Lille : il s'agit du même bâtiment où l'ONERA de Lille se trouve actuellement (avec plusieurs futures extensions du bâtiment, bien sûr) [Figure 2.5]. Le devis prévisionnel total de la construction s'élève à 2.380.179 francs qui sera totalement couvert par l'université sous l'utilisation de crédits d'outillage national en raison du fait que la construction du nouveau bâtiment fait partie en fait du programme d'extension de l'université de Lille. De plus, un crédit de 600.000 francs sera accordé par le ministre de l'Air pour l'outillage scientifique. [54] Le soir du 23 juin 1932 Albert

52. Kampé de Fériet, Conseil d'Administration du 2 juin 1930 [Archives de l'ONERA Lille].
53. Conseil d'administration du 2 juin 1930 [Archives de l'ONERA Lille].
54. Conseil d'Administration du 23 juin 1932 [Archives de l'ONERA Lille].

Caquot posera la première pierre de la nouvelle construction, une pierre que "Paul Painlevé aurait eu aimé à poser lui-même". [55]). L'Institut fonctionnera 10 mois après, le 1er septembre 1933.

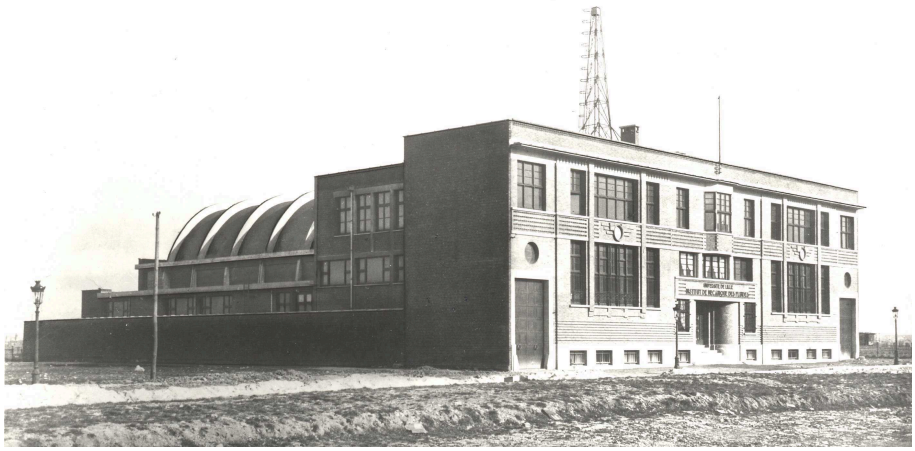


FIGURE 2.5 – L'IMFL dans les nouveaux locaux (5 du Boulevard Paul Painlevé) [Archives de l'ONERA Lille].

Si l'IMFL en 1934 disposait déjà des nouveaux locaux, d'un autre côté l'institut de mécanique des fluides de Marseille fut par exemple moins chanceux puisqu'il continuera à être dans les locaux provisoires jusqu'en 1939. Il s'agit d'un bâtiment de trois bureaux et un hall pour installer les travaux pratiques ainsi que quelques appareils pour la recherche. Il comprend une soufflerie, une cuve d'analogies électrique et un bureau de calcul. Seulement en 1938, grâce aussi à l'engagement du directeur André Marchand, l'institut réussira à obtenir à un terrain de 1200 mètres carrés et les crédits nécessaires pour la construction d'une soufflerie elliptique [56].

2.2.4 Pourquoi Kampé de Fériet a été nommé directeur de l'IMFL ?

Nous avons vu dans le paragraphe ci-dessus que la faculté des sciences de Lille a été très claire dans le choix de confier à Kampé de Fériet la direction de l'Institut. Le parcours académique de Kampé de Fériet est un cas assez particulier parce que même s'il n'était ni un normalien, ni un polytechnicien, ni agrégé il a obtenu très

55. Allocutions prononcés par Chatelet le 23 juin 1932 [Archives de l'ONERA Lille].

56. L'histoire de l'institut de mécanique des fluides de Marseille reste moins connu par rapport aux instituts. Toutefois, quelques éléments sont fournis par Jacques Valensi, directeur de l'institut pendant les années 1950, dans son discours prononcé lors des Journées de Mécanique des fluides (Marseille 1952) qui sera par la suite publié dans le volume 296 de "Publications scientifiques et technique du ministère de l'Air".

vite une considérable position institutionnelle. La preuve en est qu'il a soutenu sa thèse de doctorat à la Sorbonne à l'âge de 22 ans et il était un jeune maître de conférence quand il a été nommé directeur de l'IMFL.

Cet aspect devient encore plus intéressant si nous pensons aux parcours académiques des autres directeurs des instituts de mécanique des fluides. Joseph Pérès, agrégé et docteur en sciences mathématiques, fut un élève de l'École Normale Supérieure (promotion de 1908)[57]. Charles Camichel, est reçu à l'École Polytechnique et à l'École Normale en 1889 (à l'âge de 18 ans) où il suit le cours de Brillouin et il reçoit une solide formation en physique théorique qui influence ses premières recherches. Il est reçu également à l'Agrégation de Physique en 1892. Enfin, Henri Villat, normalien (1899) et docteur ès sciences mathématiques, revêt une autorité scientifique et institutionnelle toujours croissante après sa thèse mathématique en mécanique des fluides pour la réalisation de laquelle il prend contact avec des grands spécialistes du domaine comme Boussinesq et Brillouin. En 1919, après l'expérience de Caen et Montpellier, il fut nommé professeur de mécanique rationnelle à la Faculté des Sciences à Strasbourg. Ici, il enseigne des sujets d'hydrodynamique et s'investit fortement dans la pédagogie de la mécanique des fluides théorique [Aubin 2006]. Entre-temps, il fréquente et collabore avec le milieu parisien des chefs mathématiciens et physiciens (Picard, Appell, Brillouin et Koenigs) et il obtient des postes importants dans l'édition scientifique : rédacteur et puis directeur du *Journal de mathématiques pures et appliquées* (1921), directeur des *Nouvelles annales de mathématiques pures et appliquées* (1922), et fondateur et directeur de deux collections *Mémorial des sciences mathématiques* et *Mémorial des sciences physiques*. En 1925-1936, tandis que la mécanique des fluides parisienne trouvait son plein élan suite à la création de la chaire, Villat eut la grande opportunité d'être nommé à la Sorbonne en tant que chargé de deux séries de conférences à la fois dans la chaire de Painlevé et à l'École nationale supérieure aéronautique. C'est dans ce contexte que, grâce aussi au réseau parisien qu'il a tissu et le soutien de Painlevé dans sa candidature, il est nommé directeur de l'institut de mécanique des fluides de Paris. Pour ce qui concerne les autres villes, à Strasbourg la chaire de mécanique des fluides fut confiée à un mathématicien normalien et élève de Villat, René Thiry (1886-1968) alors qu'à Poitiers le titulaire de la chaire fut Georges Bouligand (1889-1979), un autre mathémati-

57. Joseph Pérès (1890-1962) se consacre totalement à la recherche en mathématiques pures jusqu'au moment où il sera nommé professeur de mécanique rationnelle et appliquée à Marseille (1921). Il s'intéresse à la mécanique des fluides seulement quelques années plus tard, après qu'il est devenu directeur de l'institut de mécanique des fluides de Marseille. Ici, ses recherches concernent la dynamique des fluides visqueux, le problème de la résistance d'un fluide, la théorie des tourbillons, et le calcul expérimental analogique, dont il devient un grand spécialiste au niveau international.

cien reçu à la fois à l'école polytechnique et à l'école normale supérieure en 1909 [58].

Étant donné ce contexte, il devient légitime se demander pourquoi le choix de Kampé de Fériet et quels éléments scientifiques et institutionnels ont-ils influencé ce choix.

En premier lieu, un facteur décisif fut sa mobilisation à la Commission de Gâvre où il a familiarisé avec la mécanique des fluides et les questions expérimentales, comme nous avons vu dans le premier chapitre. Outre à la faculté des sciences, même Henri Villat appréciait ses premières travaux de balistique [59].

Ensuite, il faut aussi considérer également le rapport entre lui et le recteur de l'université de Lille, Albert Châtelet. Mobilisés tous les deux à Gâvre, ils se sont retrouvés à Lille après la guerre : Kampé de Fériet maître de conférence de mécanique rationnelle à la faculté des sciences de Lille (1919) et professeur de mécanique à l'IDN (1920) [60] ; Châtelet maître de conférence de mathématiques générales (1919) à la faculté des sciences et professeur de mathématiques spéciales à l'IDN (1919) [61]. Leur collaboration scientifique se concrétisera plus tard dans la publication d'un *cours de calcul vectoriel* relatif à l'année 1920-1921, c'est-à-dire d'un cours intermédiaire entre l'enseignement de mathématiques générales de Châtelet et celui de mécanique rationnelle de Kampé de Fériet.

En dernier lieu, un autre facteur marquant concerne le degré d'importance d'un domaine de recherche en fonction de la période dans laquelle est envisagée. A titre d'exemple, prenons le cas de Louis Bachelier (1870-1946). Ce mathématicien avait soutenu en 1900 une thèse à la Sorbonne intitulée *Théorie de la spéculation*. Sa thèse fut très originale à l'époque parce qu'il montre pour la première fois l'utilisation du mouvement brownien pour évaluer les options financières, ce qui anticipe les travaux de Wiener. Malgré son audace, son travail ne fut pas bien reçu à cause des ses applications dans une zone encore inconnue et exotique pour les mathématiciens. Sa mention honorable au lieu de très honorable lui ferma les portes de l'université [Murad 2001]. Seulement Poincaré, l'un des rapporteurs a su apprécier son originalité. Toutefois, à l'étranger ses travaux furent appréciés, notamment par l'école russe de Kolmogorov. A propos de lui, Mazliak écrit :

"N'étant ni normalien, ni polytechnicien - autant dire rien du tout - il

58. Par contre nous ne savons pas qui sont les titulaires des chaires de Nantes, Lyon et Caen.
59. A ce propos, voir le premier chapitre.
60. En 1929, le poste de maître de conférence en mécanique de Kampé de Fériet sera confiée, sera confié à Robert Mazet (1909-1991), le futur fondateur du laboratoire de mécanique expérimentale à Lille.
61. En 1922 il deviendra professeur de mécanique à la Faculté des Sciences.

> se heurta à une indifférence un peu méprisante, notamment de la part de Levy qui ne voulut jamais l'écouter, avant de se rattraper in extremis à la fin de la Deuxième Guerre Mondiale pendant laquelle il avait enfin pris connaissance des travaux de Bachelier, un an avant la mort de celui-ci (1946), dans un acte de repentance assez impressionnant où il demande de lui pardonner l'injustice de son premier jugement " [Mazliak 2006, 12].

Pendant sa vie, il ne reçoit que des bourses occasionnelles pour poursuivre ses études (sur recommandation d' Émile Borel (1871-1956)) et il donne des conférences à la Sorbonne en tant que professeur gratuit entre 1909 et 1914. C'est seulement à l'âge de 57 ans qu'il aura un poste fixe à Besançon.

Comme Bachelier, Kampé de Fériet n'est ni normalien ni polytechnicien mais il choisit ses domaines d'intérêt dans des moments où ils jouissent d'une certaine importance. En 1915 il soutient une thèse en analyse, domaine dominant à l'époque et pour laquelle il obtient une mention très honorable. C'est seulement pendant et surtout après la guerre qu'il se lance vers la mécanique des fluides, dans un climat rendu très favorable grâce à l'Aéronautique et à l'impulsion de Paul Painlevé ainsi qu'aux recherches académiques de Henri Villat et Marcel Brillouin.

2.3 Les dix premières années de l'IMFL sous la direction de Kampé de Fériet (1929-1939)

Le nouveau bâtiment de l'IMFL fut inauguré officiellement le 7 avril 1934 par le ministre de l'Air dans le cadre des Journées Scientifiques de la Mécanique des fluides. Sa structure est composée par un bâtiment d'entrée et un bâtiment arrière :

- **Bâtiment d'entrée (façade sur boulevard P.Painlevé)**
  Sur le rez-de-chaussée, il comprend : un amphithéâtre de 80 places, une salle des collections et une grande salle des travaux pratiques. Au premier étage : une bibliothèque, les bureaux, une salle de dessin et une série de laboratoires pour poursuivre les recherches.
- **Bâtiment arrière**
  Il comprend : la Grande soufflerie, le canal hydrodynamique, la station d'essais hydrauliques, les laboratoires des travaux pratiques et deux ateliers.

En 1934, le devis total estimé des premières installations fut 1.145.000 francs dont 200.000 francs pour le mobilier et l'outillage général, 520.000 francs pour la Grande soufflerie, 125.000 francs pour le canal hydrodynamique et 300.000 francs pour le service de l'hydraulique. Après avoir présenté les acteurs et les installations de l'IMFL, cette section vise à montrer que l'activité de l'IMFL sous la direction

de Kampé de Fériet semble avoir une orientation conforme aux buts assignés lors de la fondation de l'institut : la présence dans la direction de scientifiques avec un arrière-plan différent permettant un bon équilibre entre les représentants des mathématiques, de la physique et de l'ingénierie ; le renforcement des liens institutionnels avec l'industrie, la région et les autres pôles de mécanique des fluides ; une égale répartition des leçons de mécanique des fluides théoriques, expérimentales et des travaux pratiques, et une plus grande attention vers les essais et la recherche expérimentale. Au même temps, nous verrons que ce type d'analyse permettra aussi de faire ressortir quelques éléments comparatifs avec les autres instituts de mécanique des fluides.

2.3.1 Les installations

La Grande Soufflerie

En 1937, la soufflerie possédait un coefficient de rendement [62] égal à 3,6, l'un des plus élevés des souffleries française de l'époque [63]. Sa construction fut possible grâce au modèle réduit de Martinot-Lagarde (à l'échelle de 1/6) [Figure 2.6] créé en collaboration avec un petit noyau d'ingénieurs au sein de l'institut de Physique alors que les plans furent réalisés par l'ingénieur Antonin Lapresle, le même ingénieur qui avait édifié la grande soufflerie de Chalais Meudon. Elle est du type Eiffel [64], à retour d'air libre et les dimensions de la halle sont de 27 m de longueur, 14 m de largeur et 12.5 m de hauteur. La chambre d'expérience au milieu de la hall est en béton et divisée en trois étages. Elle est dotée d'un collecteur (6,30 m diamètre), d'un ventilateur à 6 pales de 1,90 m de longueur et d'un diffuseur conique lié à un diffuseur torique plus grand (8,40 m). La maquette en essai est placée dans une veine d'expérience de diamètre de 2,20 m. Si le moteur électrique du ventilateur tourne à sa puissance maxima (200 CV) la vitesse du courant d'air est plus au moins de 55 m/s. Les efforts aérodynamiques (portance, trainée et les trois moments) qui s'exercent sur la maquette en essais sont transmis à une

62. Il s'agit du rapport de la puissance dans la veine à la puissance fournie au ventilateur.

63. Rapport sur la visite de la Commission de l'Aéronautique de la Chambre des Députés, jeudi 11 mars 1937 [Archives de l'ONERA Lille].

64. Juste quelques mots sur le principe du fonctionnement d'une soufflerie du type classique : l'air entre dans la chambre d'expérience par le collecteur et interagit avec la maquette. Ici l'observateur enregistrera avec des appareils tous les résultats nécessaire pour l'étude de tous les problèmes concernant les filets de l'air autour de la maquette en mouvement ou en repos. Par exemple, il peut étudier la forme de ces filets ou les forces exercées sur la maquette par la résistance de l'air. Après avoir dépassé la maquette, l'air bouge vers le diffuseur conique et il est aspiré par le ventilateur afin qu'il ait les même caractéristiques qu'elle avait avant son interaction avec la maquette. Le ventilateur a la fonction de garder le régime permanent de l'écoulement de l'air et cette soufflerie le fait "sans bruit", avec une "parfait régularité et sans turbulence". Ainsi il peut retourner au collecteur pour accomplir à nouveau une autre expérience .

balance à cinq composantes alors qu'une girouette permet la mesure des moments de tangage et de giration.

Le 15 décembre 1934, lors de la mise en marche de la soufflerie, ses dimensions lui permettaient d'être classée parmi les plus grandes souffleries de la France, après celles de Chalais-Meudon (la soufflerie géante S1Ch) et d'Issy. En effet, même si la soufflerie du centre aéronautique de Meudon avait une vitesse légèrement plus petite que celle de Lille (50 m/s) elle était 30 fois plus puissante et 25 fois plus grande, ce qui permettait de faire des essais sur des avions en vraie grandeur de 12 m d'envergure, avec moteur allumé et pilote à bord [65]. Quant à la soufflerie d'Issy, elle tournait plus vite que celle de Chalais-Meudon (80 m/s avec une puissance de 1000 CV) bien que ses dimensions fussent approximativement 4 fois plus petites.

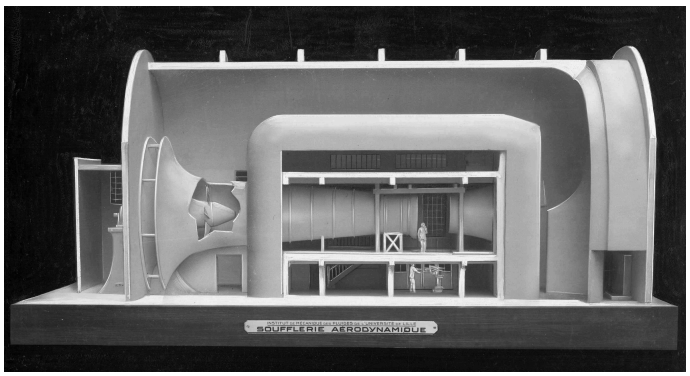


FIGURE 2.6 – La maquette en plâtre de la construction définitive de la soufflerie horizontale [Archives de l'ONERA Lille].

Le canal hydrodynamique

Cette installation fut réalisée sur les indications de Guillemet [Figure 2.7]. De la même façon que Martinot-Lagarde et ses études d'aérodynamique, il avait réalisé un modèle réduit de ce canal pour ces recherches en hydrodynamique expérimentale. Ses dimensions sont 22 m de longueur, 1. 5 m de profondeur et 1.5 m de largeur. Elle permettait d'étudier les sillages d'un fluides autour d'un obstacle à travers l'observation et la cinématographie. Plus précisément, le canal est muni d'un chariot en mouvement qui entraîne le modèle sur le fluide et mesure les efforts subis grâce à ses divers dispositifs dynamomètres. Les plusieurs appareils photographiques et cinématographiques fixés au chariot ainsi que les parois latérales de verre permettaient l'enregistrement des mouvements du fluide autour du modèle mobile.

65. Sur l'histoire des souffleries voir [Chanetz 2017–08].

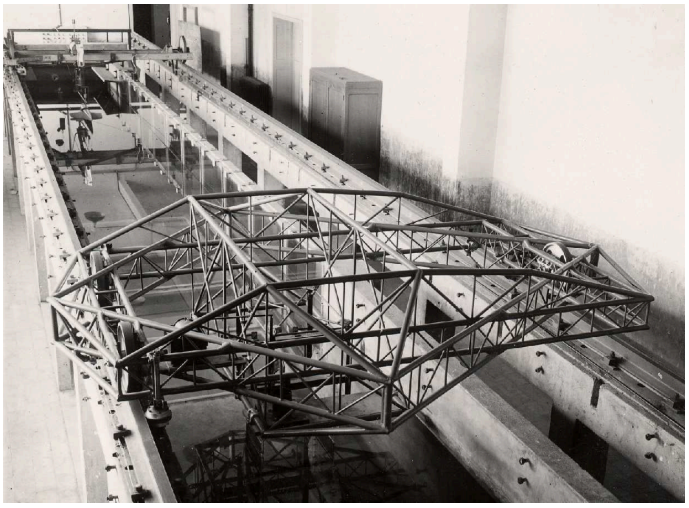


FIGURE 2.7 – Canal hydrodynamique [Archives de l'ONERA Lille].

Station d'Essais hydrauliques

Bien que sa construction ait démarré avant l'inauguration de l'IMFL, en 1937 les crédits de construction n'avaient pas encore permis d'en achever l'installation [66], ce qui nous incite à questionner l'importance des recherches hydrauliques à l'IMFL et plus en général dans quelle mesure l'industrie locale intéressant ce domaine a le même poids que celle aéronautique dans le cadre des subventions locales. Cette station se compose de quatre étages superposés ; sur le toit de l'institut un réservoir général ; au premier étage un canal d'amenée pour l'alimentation des turbines en chambre d'eau ; au rez de chaussée un canal déversoir (il règle le niveau de l'eau du canal, en déversant l'eau excédentaire) recevant l'eau des turbines et l'évacuant au sous-sol sur les bacs de jauge. Le maximum du débit est 100 litres tandis que la hauteur de chute est 80 mètres. Elle permettait de faire des recherches industrielles concernant les essais des turbines et des pompes, l'étude des problèmes hydrauliques sur des modèles réduits. Elle constitue aussi une soufflerie hydrodynamique pour l'étude des écoulements autour d'un obstacle.

Station d'Essais des ventilateurs

La salle d'essais de ventilateurs est placée derrière la grande Soufflerie et permettait d'effectuer des études et essais sur des différents types de ventilateurs jusqu'à une puissance de 500 CV.

66. Rapport sur la visite de la Commission de l'Aéronautique de la Chambre des Députés, jeudi 11 mars 1937 [Archives de l'ONERA Lille].

La soufflerie verticale

L'inauguration de la soufflerie verticale fut le 8 avril 1938. Elle est destinée aux études des vrilles des avions et procédés utiles pour permettre à l'avion de sortir d'une vrille volontaire ou accidentelle. Elle est grande de 16 m de hauteur et douée d'un maximum de vitesse du courant ascendant de 35 m/s et de ventilateurs à 4 pales [Figure 2.8].

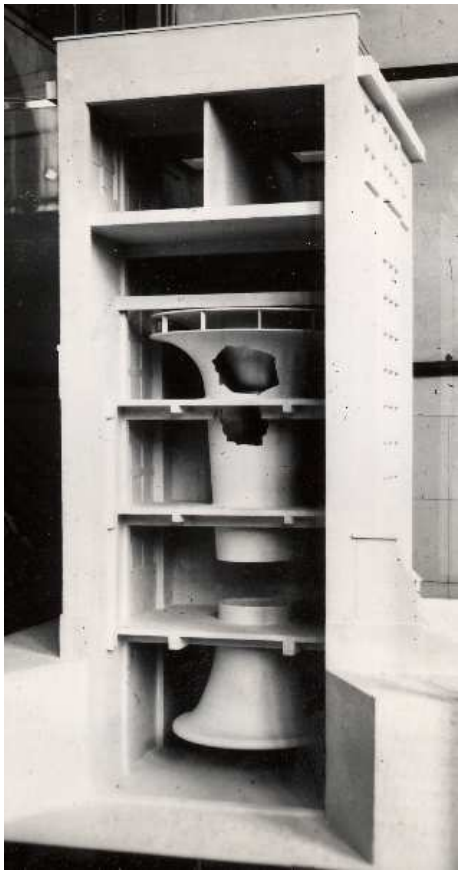


FIGURE 2.8 – Soufflerie verticale [Archives de l'ONERA Lille].

Poste Météorologique

Il s'agit d'un service qui assurait une couverture météorologique des lignes commerciales partant de Lille et autour d'elle, en particulier la ligne Bâle-Lille-Londres de Swissair ainsi que la ligne Lille-Ostende et Lille-Bruxelles de Sabena. Ce poste météorologique représente le premier point de contact entre l'IMFL et l'Office National Météorologique (ONM) de Paris. En effet, il fut installé et pris en charge par l'ONM le 1 avril 1935, dont il prend les directives techniques. Au

contraire, l'Observatoire Météorologique de Lille ne participe pas à la réalisation de ce poste :

> "Ce poste a été créé, bien entendu, avec l'assentiment de M. Gallisot, Directeur de l'Observatoire Météorologique de l'Université, qui n'a pas cru pouvoir se charger d'un travail aussi strictement spécialisé aux besoins de l'Aéronautique". [67]

De plus, le Service des Signalisations du ministère de l'Air lui fournira en 1938 un poste d'émission de radiotélégraphie afin de transmettre aux avions tous les avis météorologiques nécessaires et de communiquer avec Paris, Londres, Bruxelles et Cologne. Ce poste sera exploité aussi par le personnel militaire et jouera un rôle fondamental pendant la deuxième guerre mondiale.

2.3.2 Le caractère hétérogène du personnel de direction

Sous la demande de la faculté des sciences de Lille, le personnel de direction fut composé d'un mathématicien (Kampé de Fériet), un physicien (Martinot-Lagarde) et un ingénieur (Guillemet). Il s'agit d'une importante collaboration institutionnelle entre mathématiques, physique et ingénierie. Dans son avant-projet envoyé au ministre de l'Air, la faculté des science ne cachait pas sa forte conviction que la chaire de mécanique des fluides devait être destinée à un mathématicien auquel un assistant physicien devait être adjoint pour que la théorie et l'expérimentation soient étroitement associées dès l'origine et évoluent conjointement dans le centre :

> "La création d'une chaire de mécanique des fluides confiée à un mathématicien seul ne répond qu' à ces desiderata, car elle exigerait une adaptation progressive de ce professeur à l'expérimentation et l'acquisition pour lui plus au moins rapide des qualités spéciales correspondantes. " [68]

A **Marseille**, la faculté proposa la même structure. Le mathématicien Joseph Pérès pouvait compter sur la collaboration du physicien Lucien Malavard (1910-1990) -pour le cours et la recherche expérimentale de la mécanique des fluides - et sur l'ingénieur des arts et métiers Jacques Valensi, qui travaillait auparavant dans les souffleries d'Issy-les-Moulineaux. A Marseille, Valensi avait étudié une petite soufflerie de 65 cm de diamètre pour la mise en place de sa méthode des fumées et l'étude du champ aérodynamique autour d'un hélice. En effet, il préparait une thèse sur la visualisation des écoulements autour des pales d'hélice. Sur un autre

67. Annales de l' Université de Lille, 1934-1935 [Archives de l'ASA].

68. Avant-projet de la Faculté des Sciences de Lille (date inconnue) [Archives de l'ONERA Lille]. Il est à noter que ce texte présente des altérations et des ratures faites à la main.

plan, celui du calcul expérimental analogique, Pérès et Malavard mettaient en oeuvre leurs méthodes de calcul fondées sur les analogies électriques dont les applications à l'aérodynamique sont multiples : écoulement des sillages, écoulements méridiens, étude des propriétés des profils en courant plan et problèmes de l'aile en courant plan. Dans ce domaine, Pérès juge fondamental la coopération entre un mathématicien et un physicien :

> Mon programme a été de considérer la question dans son ensemble, sans me limiter aux applications intuitives, celles par exemple qui concernent les représentations graphiques de champs par lignes de niveau, mais en traitant systématiquement l'analogie comme un calcul expérimental donnant, par mesures directes, des valeurs numériques. Il ne pouvait être rempli qu'en collaboration, les réalisations analogiques devant se lier étroitement à l'analyse théorique, plus ou moins poussée, des questions envisagées, et j'ai eu la bonne fortune de trouver, en L. Malavard, un collaborateur hors pair, dont l'ingéniosité et la sûreté expérimentale ont été très précieux. [69]

En 1932 les deux quittent Marseille pour poursuivre leurs recherches à Paris, d'abord dans le laboratoire d'analogies électriques de l'institut de mécanique des fluides de Paris, et ensuite à l'institut Blaise Pascal en 1945 [70].

A **Paris**, l'organisation est plus grande, compliquée et coûteuse mais la structure suit la même conception fondée sur une répartition qui représente bien les côtés mathématique, physique et technique de la mécanique des fluides. Si à Lille et à Marseille le personnel de direction est constitué par un mathématicien (professeur), un physicien (maître de conférence) et un ingénieur, à Paris le ministre de l'Air décide de créer en 1929 trois chaires de mécanique des fluides, trois maîtrises de conférence et trois postes d'ingénieur. Plus précisément, Henri Villat fut nommé directeur et titulaire de la chaire de mécanique des fluides théorique et il sera assisté par le maître de conférence Henri Beghin ; Henri Bénard [71] titulaire de la chaire de mécanique des fluides expérimentale, assisté par le maitre de conférence Adrien Foch ; Gabriel Koenigs titulaire de la chaire de mécanique physique et expérimentale et il sera assisté par trois ingénieurs. Puis, un maître de conférence sera adjoint à Lucien Marchis pour sa chaire d'aviation [72]. Jean Villey et Albert Toussaint seront professeurs sans chaire. Le premier assurera les rapports avec le

69. Ce texte se trouve aux pages 22-23 de sa *Notice* conservé dans les archives de l'Académie des Sciences.

70. L'institut Blaise Pascal, rattaché au CNRS en 1945, fut créé par Pérès et Malavard, dont ce dernier fut le directeur. Il s'occupait plus en général de machines de calcul et intelligence artificielle. Sur cet institut voir [Mounier-Kuhn 2010]

71. Sur l'activité scientifique d'Henri Bénard voir [Wesfreid 2006].

72. Pour plus de détails voir [Fontanon 2017].

ministre des transports alors que le deuxième s'occupera des travaux pratiques qui s'appuient sur l'Institut Aérotechnique de Saint-Cyr, dont il est le directeur. Riabouchinski passe de son rôle de collaborateur permanent du ministre de l'Air à directeur-adjoint. En 1933, l'institut fera partie de l'Institut de Mécanique de Paris qui réunit toutes les branches de ce domaine et qui sera dirigé par Villat. Ici, l'équipe de Foch s'occupait des fluides à grande vitesse ; celle de Pérès et Malavard étudiait les analogies électriques appliquées, et Riabouchinski s'occupait de la propulsion à réacteur et de la locomotion aérienne à vitesse supersonique, en plus de l'organisation des conférences.

Au contraire de Lille, Paris et Marseille, à **Toulouse** la chaire de mécanique des fluides théorique fut confiée à un physicien, Charles Camichel. Dans ce contexte nous pouvons nous demander les raisons pour lesquelles, un physicien toujours préoccupé de la recherche dans le domaine de la mécanique appliquée et les applications industrielles déjà avant la création de l'institut, obtint ce poste. Une raison pourrait être sa formation à l'ENS et ses premiers recherches théoriques, qui appartiennent au domaine de la physique pure [73] ; ce qui lui permet d'avoir une bonne formation théorique en mécanique des fluides. Camichel était assisté par un maître de conférence, Leopold Escande (1902-1980), un mécanicien spécialiste de l'hydraulique auquel il confiera la direction de l'institut en 1941. Un accord entre la faculté des sciences et le ministre de l'Air établit qu'à ce physicien et à ce mécanicien doit être adjoint un ingénieur mécanicien.

Revenons au cas de Lille et son personnel de direction : qui sont les acteurs dans ce secteur ?

André Martinot-Lagarde (Versailles 29 octobre 1903-Paris 12 novembre 1986), fut un physicien qui joua un rôle fondamental dans la formation et la recherche expérimentale du laboratoire. Reçu à l'École Normale Supérieure en 1920, il obtient trois ans plus tard un diplôme d'études supérieures suite à un travail expérimental sur la distribution des vitesses dans un courant d'air, effectué au Laboratoire Eiffel en collaboration avec le Service Technique de l'Aéronautique. C'est ici qu'il se familiarise pour la première fois avec l'aérodynamique. Après son agrégation en physique (1924), l'intérêt pour ce domaine se développe grâce aussi à son service militaire à l'aérostation (1925) et ses trois ans en tant que boursier de recherche au Conservatoire National des Arts et Métiers à Paris. D'après Paul Germain, "il est possible, sans doute vraisemblable, qu'il a fréquenté la soufflerie de Saint-Cyr

73. Il s'agit de recherche sur l'absorption de la lumière par la matière, soit cristallisée, soit isotrope, voir sa *Notice* dans son dossier conservé à l'Académie des Sciences.

dirigé par Albert Toussaint". [74]

En 1929, il est nommé maître de conférence de Mécanique des fluides et prépare une thèse de doctorat sous la direction de Kampé de Fériet, *Sur les relations entre les forces aérodynamiques exercées autour d'un obstacle et le champ de vitesse autour de cet obstacle*. Quand l'IMFL était encore dans les locaux de l'Institut de Physique, il crée avec un petit noyau d'ingénieurs un laboratoire de travaux pratiques destiné aux étudiants et conduit l'étude des équipements nécessaires au futur IMFL, notamment la soufflerie horizontale. En 1938, il lance aussi le projet de la soufflerie verticale avec son collaborateur J. D. Vagner. Avec J. Kampé de Fériet et son collaborateur G. Rollin, il met au point l'anémoclinomètre à tête sphérique (1938), un appareil capable de mesurer les fluctuations de la vitesse du vent en grandeur et direction. Cet appareil pouvait mesurer correctement des rafales d'une durée un peu inférieure à la seconde. En juillet 1945, après le repli à Toulouse, André Martinot-Lagarde succède à Kampé de Fériet comme directeur de l'IMFL. Sa thèse sera soutenue seulement le 24 octobre 1958 devant un jury composé par Joseph Kampé de Fériet, Paul Germain, Joseph Pérès et Jean Roig, ce qui montre un parcours académique assez particulier car il devient docteur après avoir été nommé maitre de conférence et puis directeur de l'IMFL. Il sera nommé l'année suivante professeur sans chaire à la faculté de sciences de Lille, professeur à titre personnel le 1er janvier 1960 puis professeur titulaire de la chaire de mécanique expérimentale le 1er octobre de la même année. Pendant la direction de l'IMFL, il construira une soufflerie sonique pour les expériences fines d'aérodynamique transsonique ainsi qu'un bassin d'amerrissage et une grande soufflerie verticale de quatre mètres de diamètre. Spécialisé dans l'étude expérimentale de la vrille et l'analyse dimensionnelle, ses intérêts se portent également sur la turbulence, la viscosité d'un fluide, les essais en soufflerie horizontale et verticale, hydraulique et les écoulements supersoniques et transsoniques. Il quittera la direction de l'institut en 1968, mais assure pendant deux ans l'enseignement de la mécanique élémentaire en premier cycle jusqu'à son départ de Lille en 1969.

Sur un autre plan, **Henri Joseph Guillemet** (Dinan 16 mai 1905-Pau 14 septembre 1948) assurait son rôle d'assistant et chef de travaux pratiques en tant qu'ingénieur à l'institut. Licencié ès Sciences mathématiques et physiques, il obtient un diplôme d'études supérieures de physique *Sur le durcissement des plaques photographiques* [75]. Il entre à l'IMFL le 3 décembre 1929 en tant que boursier du ministre de l'Air préparant une thèse de doctorat *Sur la résistance des corps*

74. *Martinot-Lagarde (André)*, Annuaire 1989 des Anciens Élèves de l'École Normale Supérieure [Archives de l'ONERA Lille].

75. Nous ne disposons d'aucune information à propos du lieu et la date de ce travail.

solides en mouvement accéléré dans un fluide. Après son doctorat, il est nommé chef du canal hydrodynamique, grâce aussi à la construction de son modèle réduit à l'institut de Physique pendant les premières années de l'IMFL. Il poursuivra sa carrière à l'IMFL, jusqu'à son décès prématuré en 1948. Son dernier travail, effectué en collaboration avec son collaborateur Paul Guienne, concernait une méthode de calcul de la trainée minimum d'avions [76] Dans la préface de ce travail, Guienne lui dédie un petit mot :"jusqu'à sa mort, survenue au moment où ce mémoire venait d'être achevé, il n'a cessé de nous guider de ses conseils et de nous faire profiter de ses connaissances étendues ". Ses recherches tournent autour des essais expérimentaux au moyen du canal hydrodynamique et la construction d'appareils pédagogiques pour l'enseignement élémentaire des principes de la mécanique des fluides et l'aéronautique. Il présentera ses réalisations à plusieurs occasions comme par exemple au Congrès de l'enseignement du second degré au Havre en 1936, celui dans la salle de l'aviation de Lille en 1937 et au Salon de l'aéronautique de Paris. De plus, sous demande du ministère de l'Air ses appareils seront réalisés en série pour être distribués aux établissements de l'Enseignement Technique ou bien pour les stages destinés au personnel enseignant.

2.3.3 L'équipe de l'IMFL. Une histoire des moins connus

Dans ce paragraphe nous présenterons, dans la mesure du possible, quelques éléments biographiques des collaborateurs de l'IMFL et des élèves de Kampé de Fériet pendant la période (1929-1939), ce qui permet de valoriser la vie des "plus petits", des moins connus dans l'histoire de la mécanique des fluides [77]. Pendant ses dix ans de direction Kampé de Fériet aura au moins 7 étudiants qui feront une thèse avec lui, et qui comprennent des mathématiciens, ingénieurs et physiciens. Il s'agit d'un nombre assez satisfaisant pour une université de province de l'époque [78]. Pendant la seconde guerre mondiale, un septième étudiant jouera un rôle fondamental dans l'activité de l'IMFL : Naftali Frenkiel (1910-1986). Nous nous focaliserons sur ce physicien dans le chapitre final de la thèse.

André Fauquet (20 février 1913- ?)

Ingénieur IDN, il est nommé par Kampé de Fériet chef du Service des Ateliers le 21 octobre 1935. D'après un témoignage d'un collaborateur de l'IMFL, Maurice

76. Il s'agit d'une publication de l'ONERA, rapport technique n. 43.

77. Malheureusement, nous ne disposons pas de photos permettant d'identifier les collaborateurs mais nous avons retrouvé, dans les Archives de l'ONERA Lille, quelques caricatures très originales. Voir l'annexe C à ce propos.

78. Cependant, il s'agit d'un nombre assez petit par rapport à Paris : 12 thèses sous la direction d'Henri Villat, 12 pour Pérès, 6 pour Riabounchiski, 6 pour Bénard, 2 pour Foch et 13 sans précision de direction [Fontanon 2017].

Dubois, "de 1946 à 1950, à Lille, André Fauquet, seul ingénieur lillois revenu de Toulouse, fut l'adjoint efficace du Directeur, A. Martinot-Lagarde, pour la remise en route de l'IMFL. Il s'occupait de toutes les questions matérielles et de l'approvisionnement ". Il a soutenu une thèse *Sur l'application de la théorie de la ligne portante à deux ailes munies de spoilers*, laquelle sera publiée en 1954. Ses recherches portent sur l'étude de certains éléments d'un avion au moyen de la soufflerie et en vol.

Paul Guienne (31 mars 1912- ?)

Ingénieur de l' Institut catholique d'Arts et Métiers de Lille (ICAM), Paul Guienne fut le premier chef de la grande Soufflerie. En 1938, P.Guienne dut se retirer à cause d'une affection pulmonaire probablement due à des écarts des pressions entre l'intérieur de la chambre d'expérience et l'extérieur. Kampé de Fériet le remplace alors à la tête de la soufflerie horizontale, par André Fauquet, jusqu'à la guerre, Guienne restant officiellement titulaire. A l'IMFL, il exploite la soufflerie pour étudier les aspects de la turbulence, l'influence de l'hélice sur la stabilité des avions. Il crée également un dispositif spécial pour mesurer le moment de roulis en soufflerie. Après la guerre, il deviendra ingénieur en chef de la Société Bertin, où il consacre ses recherches aux aérotrains et aux aéroglisseurs. Ici, il réalisera un prototype d'aéroglisseur assez connu, l'Aérotrain Expérimental 01 en collaboration avec Maurice Berthelot et Jean Bertin.

Jean-Daniel Vagner (25 octobre 1910- ?)

Cet ingénieur IDN fut le premier chef de la soufflerie verticale, laquelle fut inaugurée en 1938. Sous la direction de Kampé de Fériet, il réalise une thèse d'ingénieur-Docteur sur la *Résistance d'une sphère en mouvement accéléré dans un fluide* qui fut soutenue le 27 novembre 1937, et qui lui valut une mention très honorable. Nous avons déjà eu l'occasion de voir le contenu de sa thèse, qui représente une sorte de continuité entre les travaux de balistique de Kampé de Fériet et les recherches de mécanique des fluides de l'IMFL, en particulier celles de Guillemet concernant l'influence de l'accélération sur la résistance hydrodynamique d'un corps. Rappelons seulement qu'il s'agit d'une étude par l'enregistrement photographique du mouvement accéléré d'une sphère tombant en chute libre où, pour les mesures, il utilise la méthode de Kampé de Fériet et Gabriel Foex de Gâvre sur l'enregistrement photographique de la vitesse des projectiles.

Jean Sauvegrain

Licence és Sciences, Faculté de Sciences de Lille, il entre à l'IMFL en tant qu'étudiant de Kampé de Fériet préparant une thèse d'université *sur la structure du vent et en particulier l'influence du relief sur les courants ascendants*. En 1934, il devient le premier directeur du poste météorologique de l'IMFL. Ses recherches concernent l'aérologie et turbulence. Sous la demande de la chambre de commerce de Boulogne, il est chargé d'effectuer en 1936 des études aérologiques pour la construction de l'aérodrome de Boulogne-Alprecht. Plus précisément, il devait comprendre quelles étaient les zones de turbulence existantes, en suivant la force des vents. Probablement, il est décédé assez jeune quand encore il travaillait à l'IMFL. Il y a des traces de lui jusqu'au 1936 sur des documents liés à son salaire.

Georges Rollin (1915-2001)

Nous connaissons son activité à l'IMFL grâce à l'*Autobiographie de Georges Rollin "mémoire d'un ingénieur de recherche, contribution à l'histoire de l'aéronautique*" conservée dans les archives de l'ONERA Lille. Entré à l'IDN en 1932, il rejoint après trois ans le personnel technique en tant que directeur du poste météorologique en remplaçant Jean Sauvegrain. Nous doutons qu'il ait jamais fait une thèse à l'IMFL pendant cette période. Il restera à l'IMFL jusqu'à sa retraite. Ses recherches sont principalement autour des appareils photographiques et des équipements pour étudier la turbulence en vol. Afin d'étudier les équipements de mesure aérologique existants, il réalise aussi une soufflerie d'étalonnage du type Eiffel de 0,80 m de diamètre.

Pierre Dupuis

Cet ingénieur entre à l'IMFL le 5 juillet 1935 et il est nommé par Kampé de Fériet chef du service des ventilateurs. Il est chargé d'effectuer des essais de ventilateurs et pompes ainsi que d'étudier l'écoulement de l'eau dans une pompe centrifuge. Il réalise aussi des appareils pour la visualisation de l'écoulement dans une pompe ou une turbine. Malheureusement, nous n'avons pas trouvé d'autres traces biographiques concernant cet ingénieur.

Jean Charles Alexandre Demontis (1910-?)

Né à Oran, en Algérie, cet ingénieur IDN entre à l'IMFL en 1930 pour faire une thèse sur l'*Influence de l'angle d'ouverture d'un ajutage divergent sur l'écoulement à deux dimensions de l'air à travers cet ajutage*, qu'il soutiendra le 4 mars 1936. Sur suggestion de Lapresle, sa thèse aborde l'étude d'un écoulement à deux dimensions de l'air dans un canal divergent. Pour ce canal, composé de deux étages où on peut

régler l'angle d'inclination, il a créé un manomètre qui fournit la pression en 18 points simultanément et enregistre les décollements des filets de fluide. La fin de son expérience à l'IMFL coïncide avec la soutenance de sa thèse.

Perrin

Licencié és sciences et ancien élève de l'École des Arts et Métiers de Lille, il entame en 1934 une thèse de doctorat sous la direction de Kampé de Fériet *Sur un essais de théorie fonctionnelle de l'écoulement d'un fluide autour d'un corps solide*. Il s'agit du deuxième boursier du Ministère de l'Air (1934-1939), après Guillemet qui devient chef des travaux pratiques après ses cinq années de bourse.

Ahmed Ratip Berker(28 mai 1909 Constantinople 1909- Istanbul 27 octobre 1997)

Ratip Berker est le mathématicien de l'IMFL qui, avec Kampé de Fériet, s'occupait des recherches de mécanique des fluides théorique. C'est le plus connu parmi tous les étudiants de Kampé de Fériet que nous avons mentionnés auparavant. Après avoir obtenu son diplôme d'ingénieur à l'institut électromécanique de Nancy (1932), il gagne une bourse du gouvernement turc pour une thèse de doctorat à l'IMFL (1932-1936). Entre temps, il est nommé maître de conférence à la faculté des sciences de Istanbul en 1934. Docteur ès Sciences mathématiques le 21 Avril 1936, sa thèse porte sur *quelques cas d'intégration des équations du mouvement d'un fluide visqueux incompressible*. Après sa soutenance, il quittera l'IMFL pour rentrer à Istanbul. Sa position institutionnelle sera très influente en Turquie, d'autant plus qu'il sera nommé doyen de la faculté des sciences d'Istanbul et professeur associé à la Sorbonne.

2.3.4 Les journées scientifiques et techniques de mécanique des fluides de Lille

Du 5 au 8 avril 1934, une première et importante occasion se présente à L'IMFL pour discuter et négocier d'éventuels accords avec les industriels, à savoir les Journées Scientifiques et Techniques de mécanique des fluides. Mieux encore, elles représentent la première grande rencontre entre les divers centres de mécanique des fluides de la France [Figure 2.9].

Cet événement fut organisé par la Section Lille-Roubaix-Tourcoing de la Société des ingénieurs Civils de France en collaboration avec l'IMFL. Leur but était de faire un congrès traitant des problèmes de physique des fluides et de leurs applications industrielles, à l'occasion de la Foire commerciale d'Avril 1934. Quand

la section a appris que la séance solennelle d'inauguration de l'IMFL aurait lieu durant la même période, elle a immédiatement pris contact avec Kampé de Fériet pour unifier les deux événements. Le mathématicien accepte avec enthousiasme cette proposition et, immédiatement, il demande une autorisation au ministre de l'Air.

Ainsi, sous le patronage du ministre de l'Air V. Denain et du président de la Société des ingénieurs Civils de France, un comité d'organisation fut par la suite créé en vue de préparer l'événement, qui comprenait : M. de Fréminville, Kampé de Fériet, P. Gadenne (président de la Section Lille-Roubaix-Tourcoing de la Société des ingénieurs Civils de France) , P. Crepelle (Ancien président) et H. Neu (ex directeur général des établissements de ventilation Neu), et J. Caroni (secrétaire de la Section Lille-Roubaix-Tourcoing de la Société des ingénieurs Civils de France). Les Journées comptèrent environ 250 adhérents, en réunissant des personnalités représentant les milieux universitaire, industriel, régional et national. Parmi eux, étaient présents L. Bréguet (administrateur délégué de l'Aviation) L. Couhé (Directeur Aéronautique Civile), H. Potez président de la Chambre Syndicale des industries Aéronautiques et administrateur général des Établissements Potez à Meaulte) et des représentants d'autres industries intéressant l'aéronautique, J. Cavalier (directeur de l'Enseignement supérieure) A. Châtelet (recteur de l'Université de Lille), A. Maige (doyen de la Faculté des Science de Lille), R. Soreau (Président de la Fédération Nationale Aéronautique), A. Caquot (directeur général honoraire de l'Aéronautique), A. Lapresle (chef de la Section Aérodynamique du service des recherches de l'Aéronautique) et des personnalités de la Ville de Lille, de la Chambre de Commerce, de la Société industrielle du Nord de la France et de la Fédération des Aéro-Clubs du Nord, .

Cependant, nous sommes loin de dire que les liaisons entre l'IMFL et l'industrie étaient inexistants avant les journées de mécanique des fluides, c'est à dire dans les locaux de l'institut de physique. Elles étaient déjà consolidées bien que dans une échelle plus petite. En effet, comme les autres instituts de sciences appliquées que nous avons mentionnés auparavant, l'IMFL était doué d'un Conseil d'Administration (CA), un organisme qui comprenait des membres représentant la faculté des sciences, l'industrie, la région et la Ville de Lille. Le conseil permettait à l'institut d'être en contact direct avec la société et de lui rendre des services, ce qui lui permettait d'avoir une certaine autonomie envers l'état et l'université et de recevoir les subventions locales nécessaires au fonctionnement de son activité. En 1930 le conseil comprenait : Châtelet (président), Maige (vice-président), Kampé de Fériet (secrétaire) et d'autres membres : M. Genet (directeur de l'IDN), Gallissot, (directeur de l'observatoire astronomique), Swingendauw (directeur de l'institut

électromécanique), des personnalités représentant le ministre de l'Air, la faculté des sciences, l'enseignement technique, des personnalités régionales (Municipalité de Lille, le Conseil Général du Nord, la chambre de commerce), des associations aéronautiques régionales et les industriels. Henri Villat (membre d'honneur) fut un membre du conseil, dans le rôle de celui qui a aidé le ministre dans l'élaboration de son programme national. Parmi les personnalités industrielles et membres du CA, il y en a deux qui se distinguent pour leur longue et constante collaboration avec Kampé de Fériet, jusqu'à la fin de sa direction : Henri Potez et Henri Neu. Le premier était le chef et fondateur d'une importante entreprise française de construction d'avions installée à Meaulte ; elle profitera à partir de 1934 des souffleries de l'IMFL pour réaliser ses essais de prototypes. Le deuxième était à la tête d'un établissement de ventilation et de conditionnement de l'air qui exploitera outre la grande soufflerie, la station des essais des ventilateurs. Kampé de Fériet juge précieuse leur présence pour la vie de l'institut :

> "Dès maintenant je me permets d'attirer l'attention des membres du conseil sur l'aide efficace qu'ils peuvent nous apporter, en faisant connaître, dans la Région du Nord, ce que notre outillage scientifique est susceptible de faire pour de multiples industries. M. Henry Potez et M. Henri Neu, en inaugurant les premières relations suivies de l'Industrie avec l'Institut, se sont acquis notre profonde gratitude ; qu'ils me permettent de joindre à l'expression renouvelée de cette reconnaissance le souhait que l'échange soit fructueux pour tous, alimentant nos chercheurs en problèmes intéressants et renforçant encore le rayonnement de leur maison, dont les bureaux d'études sont toujours à l'avant-garde du progrès" [79]

Au-delà de ceci, leurs ingénieurs apportèrent leur aide lors de la construction de l'outillage scientifique de l'IMFL. Par exemple, le diffuseur et le ventilateur furent réalisés grâce au directeur actuel de la Maison Neu, R. Chappuis.

Sur un autre niveau, les journées furent un important moment d'échanges scientifiques entre les divers spécialistes de la mécanique des fluides de la France, ce qui renforce les liens entre les instituts et jette les bases d'une future communauté scientifique de mécanique des fluides en France. Parmi les conférenciers, les savants et les ingénieurs des autres pôles de mécanique des fluides furent nombreux [80]. Par exemple, en ce qui concerne le pôle de Paris, D. Riabounchinsky avait présenté une communication sur les théories de l'hélice propulsive alors que

79. Conseil d'administration du 23 mai 1933, [Archives de l'ONERA Lille].

80. Voir la liste des conférenciers, adhérents, et communications dans le fascicule publié par le comité technique sous le titre *Les Journées Scientifiques et Techniques de Mécanique des fluides* , Éditeur Chiron (1935).

l'exposé d'H. Bénard portait sur ses tourbillons cellulaires et celui du directeur de l'Institut Saint-Cyr, A.Toussaint, portait sur l'influence des limitations d'une veine rectangulaire sur les caractéristiques des ailes sustentatrices [81]. De Toulouse, C. Camichel avait parlé des régimes transitoire et hydrauliques et A. Tenot des hélices à pales fixes hydrauliques. De Marseille, ce sont les étudiants de A. Marchand qui présentèrent deux communications : J. Valensi parla d'une étude de l'écoulement de l'air autour d'une hélice et A. Favre des spectres d'ailes dans le canal hydrodynamique. Quant aux pôles plus petits, le titulaire de la chaire de mécanique des fluides de Strasbourg, R. Thiry, présenta avec son collaborateur L. Sackmann un exposé sur les liens qui existent entre les écoulements entre glaces parallèles et les écoulements théoriques à deux dimensions alors que J. Luneau, assistant de mécanique des fluides rattaché à la chaire de Nantes, parla de l'influence de l'accélération sur la résistance de l'air autour des ailes. H. Villat et A. Marchand ne présentèrent pas de communication mais furent présents ainsi que L. Toretti de la Faculté des Sciences de Caen. Il y avait même deux professeurs provenant de l'étranger : Nokkentwed de l'École Polytechnique de Copenhague et Frédéric Haus, ingénieur aéronautique de Gand. Cette ouverture aux instituts de étranger se manifeste également dans la circulation de leurs publications non seulement en France mais aussi en Allemagne, en Italie, en Grande-Bretagne, aux États-Unis etc. (cf. annexe E).

81. Il y a aussi une communication de M. Roy et G. Darrieus

FIGURE 2.9 – La photo souvenir des adhérents aux "Journées Scientifiques et Techniques de Mécanique des Fluides" (Lille, 1934) [Archives de l'ONERA Lille].

2.3.5 L'enseignement. Un équilibre entre théorie, expérimentation et pratique

Dans la logique du renforcement du côté expérimental de la mécanique des fluides au sein du milieu de la formation, le ministre de l'Air établit un programme d'enseignement qui prévoit que les cours théoriques soient bien proportionnés aux cours expérimentaux et aux travaux pratiques. En particulier, à Lille, la gestion de l'enseignement fut confié au personnel de direction. Plus précisément, l'enseignement de la mécanique des fluides théorique fut conféré à Kampé de Fériet, en tant que titulaire de la chaire de mécanique des fluides, alors que Martinot-Lagarde, en tant que maître de conférence de mécanique des fluides, assurait la direction des travaux pratiques des élèves ainsi que l'enseignement du cours de mécanique des fluides expérimentale et Aérodynamique appliquées à l'Aviation. Les cours et/ou les manipulations s'adressaient aux élèves de la faculté des sciences, de l'IDN, de l'École des Arts et Métiers et de l'Institut Électromécanique (ex-institut électrotechnique) [Table 2.2].

Concernant la Faculté des ciences, les élèves concernés étaient les candidats à

la Licence préparant le Certificat de Mécanique des Fluides ainsi que les étudiants d'un niveau supérieur préparant le Certificat d'Aérodynamique et Hydrodynamique Supérieure (équivalent au diplôme d'études supérieures). De même, un Diplôme d'Université de Mécanique des fluides était disponible pour les étudiants qui ne possédaient pas le titre universitaire requis pour la Licence ès Sciences mais qui en même temps aspiraient à accéder au personnel technique de l'Aéronautique. Dans tous les autres cas, les élèves de troisième année de l'École des Arts et Métiers effectuaient des manipulations dans les laboratoires de l'institut à partir du 1er janvier 1935 alors que ceux de l'institut électromécanique ne suivaient que le cours de mécanique des fluides expérimentale, sans postuler à aucun diplôme. Quant à l'IDN, l'institut créa une section d'aéronautique en 1932, spécialement pour les élèves intéressés par les cours de mécanique des fluides de l'IMFL.

La section d'aéronautique de l'IDN

Lors de la séance du Conseil d'Administration du 2 juin 1930, Kampé de Fériet proposa un accord entre l'IMFL et l'IDN pour permettre aux élèves-ingénieurs de participer aux cours de mécanique des fluides. Ainsi, une nouvelle section avec mention "Mécanique-Aéronautique" fut adjointe aux autres sections existantes comme option de la troisième année (Mécanique-textile, Électricité, Chimie industrielle et agricole). De plus, le Diplôme d'Ingénieur avec cette mention donnait droit à l'entrée directe en deuxième année de l'École Supérieure d'Aéronautique [82] et plus généralement permettait de former des élèves-ingénieurs qui pouvaient être facilement recrutables par le ministre de l'Air pour son personnel technique [83] . Cette solution fut donnée par Kampé de Fériet pour répondre aux intérêts des élèves de 3e année de l'IDN qui désireraient effectivement suivre les cours de mécanique des fluides. En fait, au début du cours de la rentrée 1929-1930 les auditeurs étaient au nombre de 12 mais après trois semaines ils étaient réduits à la moitié parce que ce cours ne pouvait rien ajouter au programme déjà chargé de leur école. Les élèves de 3ème année de la section aéronautique de l'IDN suivaient à l'IMFL les cours de mécanique des fluides théorique, expérimentale et appliquées à l'Aviation. En plus, à partir de 1935, il y a aussi une extension du service de l'enseignement aux élèves de deuxième année de l'IDN, lesquels pouvaient effectuer 20 manipulations auprès du laboratoire de l'institut.

En outre, la collaboration entre l'IDN et l'IMFL fut possible grâce aussi à Albert Châtelet, qui avait renforcé les liens entre la Faculté des Sciences et l'IDN à la fin des années vingt, en modifiant l'organisation des études. Selon ces modifications,

82. Association des ingénieurs de l'Institut industriel du Nord, Annuaire 1933 [Archives de l'Association des Centraliens de Lille].

83. Conseil d'Administration du 2 juin 1930 [Archives de l'ONERA Lille].

les élèves ingénieurs devaient être immatriculés à la Faculté des Sciences à partir du mois d'octobre 1929 et en dernière année ils pouvaient se spécialiser dans les instituts de la faculté [84]. De plus, si d'un côté les professeurs donnaient certains cours techniques à l'IDN, de l'autre côté les étudiants suivaient la plupart des cours théoriques à la Faculté des Sciences (mathématiques, physique, chimie, mécanique rationnelle et appliquée) [85].

Le programme des cours de l'IMFL

La structure du programme prévoyait un enseignement de base et un enseignement complémentaire. L'enseignement de base était destiné aux élèves préparant la Licence et à ceux préparant le Diplôme d'Université de mécanique des fluides ; son programme, défini par Villat et Caquot, était le même dans tous les pôles de mécanique des fluides. Sur la base de ce programme, nous pouvons noter une proportion bien équilibrée entre théorie, expérimentation et pratique. En effet, les 25 leçons annuelles de mécanique des fluides théorique étaient accompagnées par autant de leçons de mécanique des fluides expérimentale et 25 leçons d'aérodynamique appliquées à l'aviation (cf. annexe D). Ces enseignements étaient suivis par les élèves de la Faculté des Sciences et les élèves de l'IDN. De plus, chaque semaine le cours prévoyait une leçon de mécanique théorique, une leçon de mécanique expérimentale, une leçon d'aérodynamique appliquée à l'aviation, une conférence d'application et une séance de travaux pratiques. En revanche, l'enseignement complémentaire comprend un cours d'Aérodynamique et Hydrodynamique supérieure, dont le niveau, plus élevé, est destiné aux élèves de la Faculté des Sciences candidats à l'Agrégation et aux futurs chercheurs. Le cours peut changer dans les différents pôles de mécanique des fluides. A Paris par exemple, le certificat supérieur offrait une option de mathématiques, de mécanique des fluides et d'hydrodynamique visant à attirer surtout les normaliens et les meilleurs élèves de Sup'Aéro [Fontanon 2017].

A Lille, le cours change chaque année en se focalisant sur l'étude d'un chapitre différent de la mécanique des fluides. En lisant les rapports contenus dans les Annales de l'Université de Lille, pour l'IMFL nous avons trouvé les enseignements complémentaires suivants :

1. Le fluide visqueux 1930-1931
2. Les théories modernes de la résistance des fluides 1931-1932
3. Recherches récentes sur les régimes d'écoulement de l'air 1932-1933

84. Conseil de l'université, séance 15 octobre 1929, [Archives Départemental du Nord, 2T640.]
85. Association des ingénieurs de l'Institut industriel du Nord, Annuaire 1936 [Archives de l'Association des Centraliens de Lille].

4. Étude de la turbulence atmosphérique 1933-1934
5. Étude de la turbulence atmosphérique, recherches théoriques et expérimentales 1934-1935
6. Thermodynamique de l'atmosphère 1935-1936
7. ? 1936-1937
8. Mécanique statistique de la turbulence 1937-1938
9. Le spectre de la turbulence 1938-1939

Nous pouvons remarquer qu'à partir de 1933, les enseignements convergent vers la théorie de la turbulence, sujet de prédilection de l'IMFL pendant la direction de Kampé de Fériet. Le cours d'Aérodynamique et Hydrodynamique supérieure semble donc représenter l'identité de certains des instituts du ministre de l'Air.

Nombre d'étudiants participants aux cours ou aux manipulations

Année	Cours de base	Cours supérieur	section aéronautique IDN	École des Arts et Métiers
1929/30	5	4	5	0
1930/31	7	1	N.C	N.C
1931/32	7	6	5	0
1932/33	10	6	4	0
1933/34	8	10	5	0
1934/35	10	9	6	94
1935/36	3	11	7	72
1936/37	6	12	28	67
1937/38	8	1	N.C	50
1938/39	12	2	60	21

Tableau 2.2 – Tableau du nombre d'étudiants qui suivent les cours de l'IMFL où ils participent aux manipulations. Dans la première colonne, il y a le nombre d'élèves qui ont suivi les enseignements de base de la mécanique des fluides, notamment ceux préparant le certificat de licence de mécanique des fluides (Faculté des Sciences) et le diplôme d'université. Dans la deuxième colonne, il y a les étudiants de la faculté des sciences qui ont suivi les cours d'aérodynamique et hydrodynamique supérieure. Enfin, dans les troisième et quatrième colonnes, il y a respectivement le nombre d'élèves-ingénieurs de la section aérodynamique et le nombre d'élèves de l' École des Arts et Métiers participant aux manipulations. Nous avons fait ce recueil de données grâce aux rapports de Kampé de Fériet sur l'IMFL, contenus dans les Annales de l'Université.

2.3.6 La recherche et les essais industriels

Même si les instituts fonctionnaient sur la base d'un programme national, leurs recherches étaient remarquablement différentes à cause des financements

reçus au moyen des subventions locales. En un mot chaque institut exploitait son potentiel local de manière différente.

A Toulouse par exemple, si une partie des travaux était destinée aux industries aéronautiques, Latécoère et Dewoitine, la plupart des activités étaient destinées à l'hydraulique et aux producteurs d'énergie électrique. Pendant les années 1940, les souffleries n'étaient pas autant exploitées qu'à Lille et à Marseille, d'autant plus que les premiers essais d'une maquette furent effectués seulement en 1936, quatre ans après Lille [Charru 2016, 57]. Les recherches sous la direction de Camichel furent consacrées notamment à la similitude des écoulements, l'hydraulique fluviale, la chronophotographie, les tourbillons de Bénard-von Kármán impliqués en hydraulique, l'instabilité et la transition à la turbulence [86]. En effet, quand le ministre de l'Air décida de créer l'institut de mécanique des fluides à Toulouse, cela ne fut pas pour la présence de l'industrie aéronautique mais pour bénéficier des acquis de la recherche du laboratoire d'hydraulique.

Pour ce qui concerne Paris, les collaborations extérieures furent établies surtout avec l'aviation commerciale. Pour ses recherches expérimentales, l'institut parisien s'appuyait sur les services techniques de l'Aéronautique civile et militaire qui était mis à la disposition d'étudiants, de chercheurs et de collaborateurs de l'institut : les souffleries du laboratoire Eiffel, de Chalais-Meudon, de l'Institut Aéronautique de Saint-Cyr, l'escadrille des essais de Villacoublay et le bassin de carènes de la Marine de Paris [Fontanon 2017].

Sur un autre plan, l'institut de Marseille travaillait sur des problèmes posés par la construction aéronautique à l'aide des méthodes analogiques. Ici, l'appareil "calculateur d'ailes" de Malavard (1932) s'avère d'une grande importance pour les constructeurs d'équipements aéronautiques et le directeur du ministère de l'Air, Jean Villey, proposa la création d'un bassin hydrodynamique pour l'étude des carènes des bateaux. Après la guerre, cet institut entreprendra des collaborations avec la Société Hispano Suiza, une entreprise espagnole d'automobile, de construction et d'équipement aéronautique mais aussi avec l'entreprise grenobloise Neyrpic.

A Lille, la recherche industrielle tournait principalement autour des industries aéronautiques. En 1936, 54,1 % de l'activité de la Grande Soufflerie fut consacrée à l'étude de maquette d'avions pour divers maisons de construction aéronautique [87].

86. Ces recherches ont déjà été bien étudiées par François Charru dans son article [Charru 2017–08].

87. Rapport sur la visite de la Commission de l'Aéronautique de la Chambre des Députés, jeudi

Les mesures comportaient la détermination de la polaire (portance et traînée, en fonction de l'incidence), la mesure des moments de tangage et de giration, la mesure du roulis et d'autres caractéristiques aérodynamiques de la maquette en essai. Les factures émises par l'IMFL [88], montrent qu'un grand nombre d'essais furent destinés à la Maison Potez, notamment à ses avions (P541, P620, P63, P56, P63, P54, P66, etc..) et hydravions (P453, T34, C141). Les autres entreprises aéronautiques mentionnées sont les Chantiers aéro-maritimes de la Seine produisant des hydravions (Sartrouville), la société tchécoslovaque de construction aéronautique AVIA (Prague), la Société des aéronefs Mignet (Meaux), les Chantiers aéronavals Étienne Romano (Cannes) et la Société des avions Caudron-Renault (Issy les Moulineaux).

Au delà du secteur aéronautique, d'autres recherches furent effectuées pour d'autres entreprises. Par exemple, sous la demande de la Maison Neu, une collaboration a été entreprise pour l'utilisation de la soufflerie pour des nouvelles solutions concernant la forme des pales du ventilateur et le profil de l'extrémité du diffuseur, ainsi que des essais de plusieurs ventilateurs dans la Station des essais des ventilateurs ; à ce propos, l'IMFL avait fabriqué un appareil pour la visualisation de l'écoulement dans une roue de ventilateur de pompe ou de turbine. D'autres mesures en soufflerie furent destinées à la Société Électrique LILLE—ROUBAIX— TOURCOING (E.L.RT.), laquelle voulait déterminer sur une maquette d'une voiture de tramway la position idéale pour des orifices d'entrée d'air destinés à assurer l'aération d'une voiture de tramway sans avoir recours à l'ouverture des glaces ni au fonctionnement d'un ventilateur. Enfin, des essais d'éoliennes et d'aspirateurs statiques furent mis en place respectivement pour la Maison Chêne et la Maison Chanard-Étoile ; des mesures des efforts s'exerçant sur une cheminée furent effectuées dans la grande soufflerie à la demande de la Maison Larbanet.

La recherche s'élargissait même au secteur automobile et automotrice, notamment pour la Maison Peugeot et La Compagnie du Nord. Ici, les essais étaient possibles grâce à l'installation d'un tapis roulant dans la grande soufflerie réalisant un sol animé qui permettait l'étude correcte des phénomènes aérodynamiques autour d'une maquette de véhicule.

En plus de l'industrie, l'IMFL travaillait pour le Service Technique de l'Aéronautique en échange de subventions reçues par le ministre de l'Air. La plupart des recherches demandées tournaient autour des sujets suivants :

11 mars 1937 [Archives de l'ONERA Lille].

88. Activité SH Factures 1934-1939, [Archives de l'ONERA Lille].

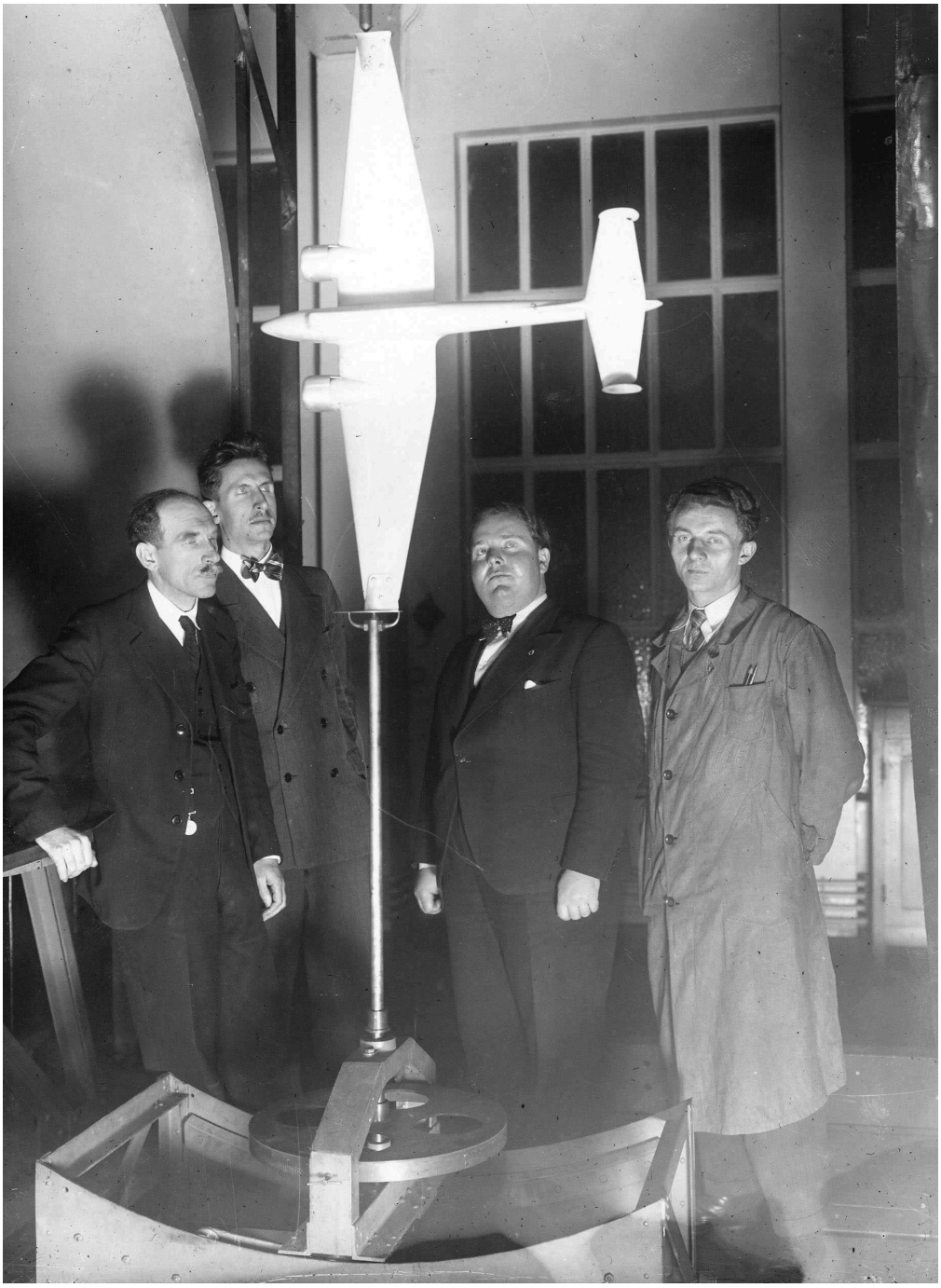


FIGURE 2.10 – IMFL : Visite de la soufflerie horizontale dans les années 1937-1938. Maquette d'un avion Potez, type P-63, attachée sur un montage dit de "girouette Lapresle". De gauche à droite : Kampé de Fériet, directeur de l'IMFL ; Martinot-Lagarde, son adjoint ; un ingénieur des Établissements Potez et Guienne, un responsable de la soufflerie [Archives de l'ONERA Lille].

— L'influence de l'accélération sur la résistance d'un fluide. En effet, "la connaissance de cet effet aurait de l'importance pour l'Aéronautique en vue de prévoir les actions s'exerçant au décollage, à l'atterrissage, pendant les manœuvres acrobatiques et même en vol normal du fait des rafales modifiant la vitesse relative de l'avion par rapport à l'air".

— La variation des efforts sur les gouvernes pendant un changement rapide de braquage et l'influence du souffle de l'hélice sur la stabilité, laquelle modifie profondément l'allure du champ des vitesses autour d'un avion puisque le passage des pales donne naissance à un système de tourbillons hélicoïdaux.

— L'Étude de la vrille au moyen de la soufflerie verticale. En effet, "l'expérience ayant montré que certains types d'avions sont incapables de sortir d'une telle vrille, quelles que soient les manœuvres exécutées par le pilote il y a donc un intérêt capital à pouvoir prévoir sur la maquette elle-même le comportement du futur avion dans une vrille, et à étudier le cas échéant les modifications à lui apporter pour qu'il puisse sortir d'une vrille à plat, amorcée accidentellement ".

— Les recherches pour la Commission de la Turbulence atmosphérique.

— Diverses études (numérotes de S.R.A.2 à S.R.A.12) sur la turbulence en soufflerie (sa production, son influence, ses effets sur les anémomètres, leur étude à travers des phénomènes de diffusion), des propriétés d'une aile dans un vent naturel, la turbulence près du sol, essais en vol à bord du avion Potez 58, la détermination expérimentale des courbes de fréquence.

Ce dynamisme à l'égard des questions d'aéronautique et d'aérodynamique est confirmé aussi par l'intense activité de la grande soufflerie dont le coefficient d'utilisation fut 0,31 à savoir le plus grand des instituts de recherche européens à l'époque, d'après Kampé de Fériet [89] : sur 2000 heures de travail le ventilateur a tourné 625 heures en 1937 et 623,7 heures en 1938. De plus le nombre d'essais en progression [Figure 2.11] "résulte de l'amélioration des méthodes de travail en particulier de l'accélération des montages et des dépouillements par l'embauche de personnel nouveau ". [90]

89. Rapport sur l'organisation et les travaux de l'Institut de Mécanique des fluides, Annales de l' Université de Lille, 1937-1938 [Archives de l'ASA].

90. Rapport sur le fonctionnement de l'institut pendant l'année 1938, 2 juin 1939, [Archives de l'ONERA Lille].

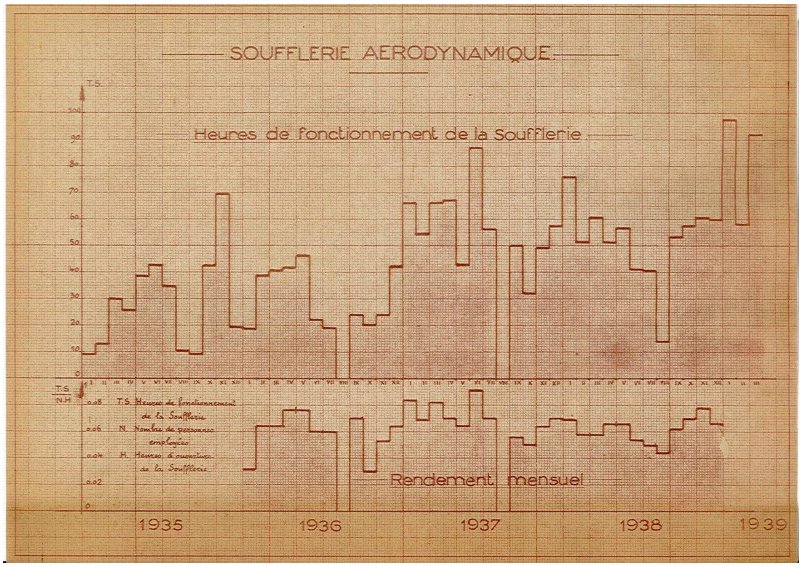


FIGURE 2.11 – Nombre d'heures de fonctionnement de la grande soufflerie de 1934 au 1939, mois par mois [Archives de l'ONERA Lille].

2.4 Conclusions

En guise de conclusion, nous pouvons nous demander si cette forme de collaboration entre le ministre de l'Air, l'industrie et l'université a conduit à un bon fonctionnement des instituts de mécanique des fluides. Par rapport à cette question, Kampé de Fériet critique ce système, notamment la façon avec laquelle l'institut reçoit les financements à travers les collaborations extérieures. Il soulève ce problème lors de la séance du 8 avril 1938 du conseil d'Administration de l'institut :

> Le système de collaborations extérieures du Service Technique de l'Aéronautique, excellent pour les laboratoires d'Université où il joue un rôle d'appoint, s'est relevé déficient dans le fonctionnement d'un établissement de caractère industriel où il est appelé à fournir des sommes considérables s'élevant à 65 % du budget.

D'après Kampé de Fériet, la recherche industrielle ne pose pas de problèmes mais présente des proportions trop petites pour assurer toute seule le bon fonctionnement de l'institut en l'attente des crédits du Ministre de l'Air. La situation budgétaire de l'IMFL semble donc être en situation de précarité pendant cette période et cela, outre la crise économique, est imputable aussi à la politique des subventions extérieures. En effet, selon ce système, l'institut était obligé de faire l'avance de règlement des factures avant tout remboursement et il fallait prévoir

au moins six mois à l'avance le budget nécessaire principalement pour la recherche demandée par le Service Technique de l'Aéronautique, laquelle occupait une place très importante dans la répartition des dépenses (65 %) par rapport à celle industrielle (15 %) [91].

La situation budgétaire rencontrera un moment de stabilité à partir du 1 juillet 1938, date où l'université de Lille signera une convention avec le Groupement Français pour le développement des Recherches Aéronautiques (GRA), présidé par l'Ingénieur Général Paul Dumanois. Cet accord assurera à l'institut "un budget permanent correspondant à ses besoins et donner[a] au personnel technique de l'Institut le statut qu'il attendait de permettre de le rémunérer de façon convenable" [92]. D'après Châtelet, "l'intervention de M. Dumanois a été décisive dans cette affaire et on peut le considérer comme le sauveur de l'institut" [93]. Ainsi, toute la recherche aéronautique sera dirigée et prise en charge par cette institution à travers une subvention fixe annuelle (580.000 francs pour le personnel technique sont prévus pour l'année 1938 par exemple), en conservant les autres sources de revenu pendant l'année : industrie (100.000 francs minimum), la Commission de la Turbulence Atmosphérique et d'autres subventions diverses (100.000 fr). L'IMFL effectuera exclusivement des recherches pour l'Industrie, pour le Service Technique et des recherches scientifiques de l'Aéronautique (S.R.A) ainsi que pour le Groupement des Recherches Aéronautiques (G.R.A) concerneront principalement des études sur la sonde de pression statique, l'influence du souffle de l'hélice sur les caractéristiques d'une aile d'un avion, la comparaison des résultats en soufflerie et des essais en vol concernant l'empennage d'un avion, des appareils enregistrant la vitesse relative de l'avion pour les essais en vol et l'influence d'une rafale verticale et horizontale sur une maquette géométriquement et dynamiquement semblable à un avion. Cet accord perdurera jusqu'en 1946 et permettra à l'IMFL de ne pas interrompre son activité pendant les hostilités, lors de son repli à Toulouse. Cet aspect sera développé dans le dernier chapitre de la thèse.

Dans ce chapitre, nous avons reconstitué la vie de l'IMFL, en mettant en évidence ses liens avec le tissu social et industriel de la ville de Lille, la nature des financements, les accords entre les universités, l'État et l'industrie, les installations, les acteurs, l'activité de recherche, les liens avec l'IDN etc. Cette étude a été rendue possible grâce à la multitude de documents repérés dans les archives de l'ONERA de Lille. Une fois dressée l'histoire de cet institut, nous nous sommes éloignés de ce cas particulier pour comprendre, dans la mesure du possible, des

91. Les 20 % restant étaient employés pour les frais relatifs à l'enseignement
92. Dumanois à Kampé de Fériet, 29 juillet 1938 [Archives de l'ONERA Lille].
93. Châtelet à Kampé de Fériet, 29 juin 1938, [Archives de l'ONERA Lille].

aspects plus généraux autour de lui et qui prennent en compte les autres instituts. De plus, à travers une analyse de la littérature secondaire existante, nous avons également dressé un panorama du domaine de la mécanique des fluides avant la création des chaires et des instituts de mécanique des fluides. Cela nous a permis de montrer qu'avant 1923 l'institutionnalisation de ce domaine n'était pas réellement inexistante en France. A côté des recherches théoriques de premier plan effectuées dans les milieux académiques (Henri Villat, Marcel Brillouin, Pierre Duhem, Joseph Boussinesq etc.), il y avait par exemple une production aéronautique importante (le laboratoire d'Eiffel, l'Institut d'Aéronautique de Saint Cyr, l'École supérieure d'Aéronautique etc.) ainsi que l'existence d'un réseau de laboratoires d'hydraulique nés au sein des instituts d'Electrotechnique de Grenoble, Toulouse et Nancy.

Toujours dans le but de s'éloigner du cas lillois pour décrire un contexte plus général à l'échelle nationale, nous avons enrichi ces travaux appartenant à la littérature secondaire avec d'autres informations repérées dans des documents conservés dans les archives de l'ONERA de Lille ainsi que dans le fonds Henri Villat. Par exemple, le rapport sur les Journées Scientifiques et Techniques de la Mécanique des Fluides de Lille de 1934 révèle que ces journées furent un important moment d'échanges scientifiques entre les divers spécialistes de la mécanique des fluides théorique et expérimentale de la France, spécialistes qui provenaient de Toulouse, Marseille, Paris, Strasbourg, Lyon, Caen etc. Ce rapport a permis de donner un peu plus d'informations sur ce réseau et sur ces spécialistes, très souvent ignorés par la littérature secondaire. Sur un autre plan, d'autres documents ont donné un peu plus d'informations (mais encore trop peu) sur l'institut de mécanique des fluides de Marseille dont l'histoire est presque inconnue. En d'autres termes, les sources d'archives et la littérature secondaire ont permis de sortir du cas lillois afin de comprendre la manière dont ce cas particulier s'harmonise avec le cas plus général qui inclut les autres instituts. Et c'est cette harmonisation du cas particulier avec un contexte plus général autour de ce cas qui conduit à une meilleure compréhension de l'institutionnalisation de la mécanique des fluides et qui nous défend de vouloir utiliser le cas lillois comme un élément qui représente cette institutionnalisation : le cas lillois, ici comme dans les autres chapitres, n'est pas un élément représentatif de la mécanique des fluides mais un élément-clé à partir duquel on peut appréhender un cadre plus général qui pourra apporter quelques réponses aux problématiques-clés de la mécanique des fluides au XX^{e} siècle. Ici, les choix méthodologiques et le concept du prisme que nous avons esquissé pour réaliser cette thèse sont donc fortement explicites.

Bien que le chapitre ne donne pas un cadre exhaustif de l'institutionnalisation

de la mécanique des fluides, il faut cependant lui reconnaître l'importance des questions qu'il permet de soulever et de développer dans des travaux ultérieurs, questions que nous n'avons pas pu aborder à cause des limites des sources d'archives. Tout d'abord, il faudra réexaminer le paysage avant la création des instituts de mécanique des fluides qui est beaucoup plus complexe que celui dressé dans ce chapitre. Dans des travaux futurs il serait intéressant de saisir de manière plus profonde cette complexité géographique, scientifique et technologique qui se manifeste non seulement dans la recherche et les enseignements dispensés dans le monde de l'aéronautique et de l'hydraulique mais aussi dans d'autres champs d'application, notamment la balistique, la météorologie et la physique de l'atmosphère. Ces derniers constituent un ensemble de domaines en interaction les uns avec les autres dont il serait nécessaire de trouver le(s) fil(s) qui permettra(ont) de mieux comprendre cette situation qui cadre mal avec les découpages disciplinaires actuels.
Ensuite, d'autres questions soulevées par ce chapitre concernent l'impact du réseaux des IMF sur ce paysage avant 1923 et vice-versa. Ces questions deviennent importantes à partir du moment où nous pensons que les instituts de mécanique des fluides ont été installés dans les mêmes villes où il y avait déjà des recherches et/ou des enseignements de mécanique des fluides dans des instituts d'autre nature concernant un ample spectre de champs d'application, instituts qui ont bénéficié du potentiel économique et universitaire local déjà avant la création du ministère de l'Air. Par exemple à Toulouse, une ville caractérisée par une importante tradition en hydraulique, le ministre de l'Air décidera de créer un institut pour bénéficier des acquis de la recherche du laboratoire d'hydraulique ; Lille disposait d'un petit centre d'aérodynamique à l'IDN et d'une importante industrie aéronautique avant la fondation de l'IMFL ; à Paris le laboratoire Eiffel et l'Institut Aérotechnique de Saint-Cyr avaient mis à disposition du centre de mécanique des fluides leurs souffleries. De nouvelles collaborations puiseront leur origine dans ces échanges. Dans le chapitre 3, nous traiterons par exemple, le cas de l'Office National Météorologique et ses collaborations avec l'IMFL dans le cadre des activités de la Commission de la Turbulence Atmosphérique. Enfin, une autre question tourne autour des liens entre les IMF. D'après les documents consultés dans les diverses archives, les Journées Scientifiques et Techniques de la mécanique des fluides de Lille semblent être le seul événement national où les instituts sont globalement entrés en contact direct entre eux. Nous n'avons trouvé aucune trace de l'existence de liens informels entre les divers instituts et tout semble être géré par les politiques d'étatisation du ministre de l'Air à travers la revue *Publications Scientifiques Et Techniques Du Ministre De L'Air* . Cette revue semble être le seul moyen de communication et d'échange entre les divers instituts, au moins avant la seconde guerre mondiale. Toute la recherche était coordonnée par le Conseil

Supérieur des Recherches Scientifiques intéressant l'Aéronautique, un conseil créé par Caquot et qui comprenait le ministre de l'Air, des personnalités de la Faculté des Sciences, des ingénieurs civils, et le Service Technique de l'Aéronautique. Cette faiblesse de liaison suscitera des difficultés liées au concept de communauté de mécanique des fluides, car les interactions entre eux ne sont pas bien tracées. Des travaux ultérieurs pourraient nuancer ces conclusions et peut-être montrer l'existence d'une recherche dynamique active entre des instituts différents. De plus cette question ne concerne que le lien entre les instituts au sens strict du terme. En général en effet, les divers spécialistes de mécanique des fluides avaient plusieurs occasions de se rencontrer et échanger dans des contextes qui vont au-delà de leur affiliation institutionnelle au sein du réseau du ministre de l'Air. A titre d'exemple, nous pouvons mentionner les contextes des ICAM, de l'Académie des Sciences ainsi que celui autour du *Mémorial des Sciences Mathématiques* édité par Villat.

Chapitre 3

Entre théorie et pratique. La théorie de la turbulence

> Et si le physicien relie le mathématicien à l'ingénieur, si l'ingénieur relie le physicien à l'industriel, ne voyons-nous pas, Messieurs, que, bon gré mal gré, nous sommes pris dans une chaines sans fin d'échanges et de services mutuels ?
>
> Raymond Poincaré (1924)

L'histoire de la mécanique des fluides est caractérisée par de fortes tensions entre théorie et pratique. D'un côté, les mathématiciens se sont concentrés sur les équations théoriques du mouvement des fluides. De l'autre côté, les ingénieurs ont longtemps été impuissants à vérifier ces équations d'un point de vue expérimental et ont ainsi utilisé des formules empiriques traditionnelles dans les applications pratiques de la mécanique des fluides. Le paradoxe de d'Alembert, par exemple, a produit plusieurs obstacles dans la compréhension du problème de la résistance d'un fluide et ses applications, des écoulements fluviaux du XVIII^{e} et XIX^{e} siècle aux problèmes aéronautiques [1].

Toutefois, les mondes de l'hydrodynamique et de l'hydraulique ne sont pas deux champs aux méthodes et identités très différentes, qui ont évolué indépendamment l'un de l'autre. Cet aspect n'est que un cliché de l'histoire de la

1. Sur le rôle de d'Alembert dans l'hydrodynamique au dix-huitième siècle voir par exemple [Guilbaud 2012] et [Guilbaud 2008].

mécanique des fluides. D'après Olivier Darrigol, il s'agit plutôt d'une "histoire des transgressions des limites entre les mondes pratiques et théoriques du fluide et les différentes sous-cultures qui la favorisent" [Darrigol 2005, VII]. Cette idée est à la base de son livre *Worlds of flow* consacré à l'histoire de la mécanique des fluides du XVIII^{e} siècle au début du xx^{e} siècle, à savoir de l'émergence de l'hydrodynamique classique à la couche limite de Prandtl, en passant par les contributions de Navier, Cauchy, Poisson, Poiseuille, Saint Venant et Boussinesq, pour nous en tenir à la France. Dans certains cas, ces théories ont emprunté des modèles à la théorie de l'élasticité comme c'est le cas des équations de Navier-Stokes [Darrigol 2002a]. L'importance de ce sujet est aussi philosophique qu'historique. L'énorme intervalle de temps qui se passe entre l'établissement des fondements d'une théorie d'hydrodynamique et le moment où elle devient applicable dans une situation concrète est un argument d'un grand intérêt philosophique et pourtant la philosophie des sciences a négligé cet aspect en se focalisant plus sur les théories fondamentales que sur celles phénoménologiques [2].

A partir du xx^{e} siècle, le rapprochement de la théorie et de la pratique devient progressivement plus marqué, outre les raisons internes, grâce à l'émergence de l'aviation et de problèmes nouveaux concernant l'écoulement de l'air. Et cela dans un contexte où la mécanique de fluides devient un enjeu économique national devant être institutionnalisé pas seulement en France mais également dans d'autres pays. En Allemagne et en Grande-Bretagne, par exemple, les origines de l'institutionnalisation de la mécanique des fluides sont beaucoup plus anciennes qu'en France et remontent déjà au début du xx^{e} siècle. La réforme de Felix Klein visant à encourager les mathématiques appliquées en Allemagne permet la naissance des premières chaires ainsi que des premières sociétés, journaux et instituts aéronautiques, en coopération avec l'industrie [Hirschel et. al. 2012], [Rowe 1989]. Dans ce contexte, l'école de l'ingénieur Ludwig Prandtl (1875-1953) à Göttingen constitue un pôle très important, tant au niveau national qu'au niveau international. Son école met en évidence une façon révolutionnaire d'appréhender les problèmes de mécanique des fluides, fondée sur l'expérimentation des théories dans les laboratoires et sur une solide formation mathématique des ingénieurs [Eckert 2007]. En 1921, édité par Richard Von Mises (1883-1953), professeur de mathématiques appliquées et mécanique à l'université de Berlin, un nouveau journal apparaît le *Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik* (ZAMM), qui devient immédiatement le principal point de référence pour les scientifique travaillant dans le domaine de la mécanique des fluides [Eckert 2012]. En Grande-Bretagne, l'ancienne tradition de mécanique des fluides [Craik 2011] est renforcée en 1909 par

2. Pour une philosophie de l'hydrodynamique et une bibliographie sur le sujet voir [Darrigol 2013].

la fondation de l'Advisory Committee for Aeronautics (ACA) dont le but était de promouvoir et institutionnaliser la recherche aéronautique à travers l'établissement des liens entre les universités, les industries et les deux instituts principaux de recherche aéronautique britannique, le National Physical Laboratory (1900) et le Royal Aircraft Factory (1908), [Barrow-Green 2014]. Ici, Geoffrey Taylor (1886-1975) [3] développe une approche similaire à celle de Prandtl. Aux États-Unis, le milieu des mathématiques appliquées est plus jeune [Siegmund-Schultze 2003a] et doit beaucoup à l'Allemagne. À partir des années 1930, plusieurs mathématiciens, physiciens et ingénieurs d'origine juive ou antinazis émigrent aux États-Unis et importent dans le pays l'analyse classique, le calcul des probabilités, la statistique et la mécanique des fluides [Segal 2002]. Dans ce dernier domaine, un rôle fondamental est joué par Theodore von Kármán (1881-1963), un étudiant de Prandtl qui quitte son poste à l'institut aéronautique d'Aix-la-Chapelle en 1930 pour émigrer aux États-Unis et accepter la direction du Guggenheim Aeronautical Laboratory du California Institute of Technology (GALCIT). Cet institut devient progressivement un pôle d'aérodynamique international très dynamique, qui poursuit la tradition allemande de Prandtl, sous l'idée d'un renforcement du point de vue mathématique du monde des ingénieurs, de leur collaboration avec les mathématiciens et les physiciens et des liens avec l'industrie et les militaires [Hanle et Kármán 1982], [Greenberg et Googstein 1983]. A Washington, Hugh Dryden dirigeait la section aérodynamique du National Bureau of Standard, où il perfectionne et développe les anémomètres [4] pour mesurer les fluctuations de la vitesses dans un écoulement turbulent dans les souffleries [5] Aux Pays Bas, en 1918, le gouvernement hollandais fonde l'Institute for Research in Aerial Navigation qui entreprendra une collaboration fructueuse avec le laboratoire d'aérodynamique de la Technical University de Delft dont la direction était confiée au physicien Jan Burgers (1895-1981) [6], l'un des co-organisateurs des congrès ICAM très proche de

3. Physicien anglais passionné par la météorologie et l'océanographie, il est à partir de 1923 professeur à la Royal Society du Trinity College à Cambridge. Son statut lui permettait de se consacrer complètement à la recherche sans enseigner. Sur sa vie scientifique voir [Sreenivasan 2011].

4. L'anémomètre à fil chaud est un appareil destiné à la mesure des fluctuations de la vitesse en un point du fluide. Il est doué d'un fil métallique d'environ 1 mm de longueur placé entre deux broches qui se chauffe en y faisant transiter un courant électrique. Les mesures sont effectuées le plus souvent dans des souffleries, en plaçant le fil perpendiculaire à la vitesse du courant d'air. Le principe consiste à mesurer la puissance transférée depuis le fil chauffé par effet Joule et refroidi par le passage du fluide. La puissance emportée par le fluide donne donc une mesure indirecte de la vitesse de l'écoulement mais pas de sa direction.

5. Sur la carrière de Dryden dans le milieu aéronautique voir [Gorn 1996].

6. J. Burgers est un physicien hollandais, pionnier dans l'utilisation des anémomètres à fil chaud pour mesurer les fluctuations de la vitesse dans un fluide turbulent dans les souffleries. Après avoir soutenu une thèse de doctorat sur le modèle de l'atome de Rutherford-Bohr (1918) à l'Université de Leiden, il devient professeur du Département d'Ingénierie Mécanique et Électrique

Von Kármán. Cette collaboration suivait l'évolution des recherches en mécanique des fluides à travers ses contacts avec les États-Unis et en recevant les bulletins de l'Institut aérodynamique de Koutchino créé par Riabounchiski en Russie, par le laboratoire de Prandtl, le ZAMM de Von Mises et les Reports ACA. Dans son laboratoire, l'équipe de Burgers développait la théorie statistique de la turbulence de Taylor-Von Kármán et celle de Oseen pour des nombres de Reynolds petits [7]. C'est là qui est étudiée ce qui s'appelle, l'équation de Burgers [8], qui donnera des importants informations sur les processus fondamentaux de la turbulence. En Russie, Nikolaï Joukovski avait fondé l' Institut central d'aérohydrodynamique (TsAGI) en 1918. Plus tard, pendant l'entre-deux-guerres, sa mécanique des fluides sera poursuivie surtout par deux écoles, l'une autour du physicien Landau, l'autre autour du mathématicien Kolmogorov. Enfin, en Italie, à côté des travaux théoriques de l'école de Levi-Civita, il y avait aussi des laboratoires d'aérodynamique comme ceux de Modesto Panetti [9] à Turin et de Arturo Crocco [10] à Rome, tous les

de l'Université Technique de Delft où il fonde le laboratoire Aéro-Hydrodynamique et deviendra l'une des plus importantes autorités de la mécanique des fluides hollandaise. En 1921, Burgers rencontre Von Kármán et à partir de ce moment-là il s'engagera dans l'organisation des ICAM. En 1955, il quittera Delft pour rejoindre l'Université du Maryland. Là, sa formation en mécanique statistique lui permettra de donner des contributions importantes à des recherches concernant les relations entre les équations de Boltzmann et les équations de la fluido-dynamique. Sur sa vie et sa contribution scientifique voir [Nieuwstadt et Steketee 2012–12–06].

7. Le nombre de Reynolds peut être défini comme $R_e = \frac{\rho V}{\mu}$ (μ est la viscosité dynamique, ρ la densité du fluide et V la vitesse macroscopique du fluide). Ce nombre permet d'évaluer si l'écoulement est en régime de Stokes (écoulement très très lent, à très faible nombre de Reynolds), en régime laminaire ou en régime turbulent où les valeurs de ce nombre sont les plus élevés. Le nombre de Reynolds correspondant à la transition d'un régime à l'autre est caractérisé par la géométrie de l'objet immergé dans le fluide en question.

8. Il s'agit d'une version de l'équation de Navier-Stokes sans la pression.

9. Modesto Panetti (1875-1957) fut un ingénieur aéronautique. Après une licence en mathématiques, il devient assistant à la Scuola d'Ingegneria de Turin. De 1902 à 1909, il est professeur de mécanique appliquée à la Scuola di Ingegneria Navale de Gênes, où il crée le laboratoire de résistance des matériaux. A partir de 1909, il est professeur de mécanique appliquée à l'Istituto superiore d'ingegneria di Torino où il fonde le laboratoire d'aérotechnique avec une section d'aérodynamique et la Scuola di perfezionamento nelle costruzioni aeronautiche.

10. Gaetano Arturo Crocco (1877-1968) fut un officiel et un pionnier de la propulsion et du vol spatial. Il suit durant deux ans des cours à l'Université de mathématiques et de physique de Palerme puis entre en 1897 à l'Académie militaire de Turin avant d'intégrer l'école d'application de l'artillerie et du génie dont il sort en 1900 avec le grade de lieutenant. Il a été directeur de l'Institut Central de l'Aéronautique de 1915 à 1920, titulaire d'une chaire sur la théorie et la conception des dirigeables à la Scuola di Ingegneria Aerospaziale rattachée à l'Université de Rome La Sapienza et professeur en aéronautique à compter de 1929. Il a présidé la section aéronautique de la Consiglio nazionale delle ricerche de 1929 à 1945. Il a été membre de plusieurs académies dont l'Accademia dei Lincei et la Reale Accademia d'Italia.

deux impliqués dans l'étude des écoulements supersoniques [11] [12].

Dans ce contexte, nous pouvons identifier au moins trois facteurs marquant le rapprochement progressif de la mécanique des fluides théorique à celle expérimentale, dont la présence de l'un est fondamentale pour l'autre. En premier lieu, le changement du point de vue des théoriciens et des praticiens. Là, l'applicabilité des théories est considérée toujours plus essentielle par les ingénieurs aussi bien que par les physiciens et les mathématiciens, qui changent *leurs approches* et mobilisent des expérimentateurs pour mettre à l'épreuve des théories toujours plus applicables. En deuxième lieu, ce sont aussi *les souffleries et les nouveaux appareils* qui ont favorisé la création des ponts entre théorie et pratique [Eckert 2008, 239]. Avant le xx^{e} siècle, la liaison entre les deux "mondes" était faible surtout parce que l'air en tant que fluide était peu étudié [13] et les connaissances empiriques de la mécanique des fluides étaient obtenus au moyen de l'observation et des mesures sur des écoulements turbulents dans des phénomènes naturels qui se vérifiaient par exemple dans des canaux ouverts, des tuyaux fermés ou dans l'atmosphère : la théorie ne pouvait pas être validée par des manipulations contrôlées en laboratoire [Eckert 2008]. A partir du début du xx^{e} siècle, les souffleries et le perfectionnement de l'outillage scientifique dans les laboratoires jouent un rôle considérable dans le développement de nouvelles théories : couche limite, turbulence, dynamique des gaz. Ces trois aires de recherche ont été les plus grandes découvertes qui ont rendu la théorie de la mécanique des fluides applicable à la pratique. En dernier lieu, l'institutionnalisation de la mécanique des fluides et de l'aéronautique crée un grand nombre de lieux physiques et de contextes (laboratoires, terrains de vol, commissions, écoles etc.) impliquant *les mathématiques* - c'est à dire l'introduction dans les laboratoires de problèmes qui requirent un haut niveau d'investigation mathématique mais en même temps qui puissent être vérifiés du point de vue expérimentale et par suite acceptés chez les praticiens - et *les mathématiciens*, qui collaborent avec les physiciens et les ingénieurs sur le plan théorique mais aussi expérimental [14].

11. Dans le centre aérodynamique de Guidonia (1918), l'équipe de Crocco possédait la deuxième soufflerie supersonique construite en Europe. De plus, ce fut lui qui organisa, en 1935, le Congrès Volta sur les grandes vitesses en aviation, l'une des thématiques les plus étudiées à cette époque à une échelle internationale.

12. La situation italienne en ce qui concerne la mécanique des fluides pendant l'entre-deux-guerres est peu étudiée et mériterait d'être approfondie. L'historien Siegmund-Schultze lui consacre une petite section dans son article sur le rôle des mathématiciens dans les milieux militaires (1915-1945) [Siegmund-Schultze 2003b].

13. Sans néanmoins négliger le cas de la balistique, de l'acoustique, de la météorologie. Cependant, il faut attendre l'aéronautique pour un véritable bouleversement de la mécanique des fluides.

14. Nous sommes loin d'affirmer que, avant cette vague d'institutionnalisation de la mécanique

Ainsi, comme dans le cas d'autres domaines scientifiques, le concept de laboratoire va remplacer de plus en plus celui de l'observation des phénomènes et favorise la formalisation mathématique des résultats expérimentaux [15]. Par exemple, dans le cas du paradoxe de d'Alembert, Prandtl avait élaboré dans son laboratoire à Göttingen une théorie mathématique appelée *théorie de la couche limite*, qui était susceptible de dépasser ce paradoxe. Cette théorie, très appréciée chez les mathématiciens, avait été légitimée par les tests expérimentaux de ses collaborateurs et, par suite, acceptée chez les praticiens allemands et étrangers qui l'utilisaient pour leurs problèmes concrets concernant les effets aérodynamiques sur profils alaires. Un exemple similaire concerne le problème de la turbulence. Dans une note mathématique du 1921, Taylor se proposa de caractériser les écoulements turbulents non plus à travers les champs de vitesse mais à travers leurs fonctions de corrélations qui sont des moyennes qui font intervenir divers points de l'espace ou de temps. A partir des années 1930, le traitement statistique de la turbulence inauguré par Taylor dans cette note, commence à être acceptée parmi les ingénieurs après avoir été vérifié par ses collaborateurs dans le NPL. Son introduction dans les laboratoires fut possible grâce au fait que les fonctions de corrélations furent associées aux mesures expérimentales à travers le concept de spectre d'énergie (le spectre est la transformée de Fourier de cette fonction).

Si Prandtl et Taylor sont deux exemples illustrant la manière dont les théories mathématiques occupent un rôle toujours plus important dans les laboratoires, Kolmogorov est un exemple qui montre comment les mathématiciens intéressés par la mécanique des fluides sont impliqués en une collaboration active avec des scientifiques provenant de milieux différents à la fois sur un plan théorique et expérimental. En effet, vers les années 1930, Kolmogorov avait commencé à s'intéresser à la théorie de la turbulence et il s'entoura alors d'étudiants spécialisés

des fluides, il n'y avait aucun laboratoire ou aucune institution susceptible d'effectuer des travaux en équipe dans ce domaine incluant des problèmes mathématiques compliqués. C'est le cas par exemple des institutions militaires comme le Centre aérostatique militaire de Chalais-Meudon dirigé par le polytechnicien et colonel Charles Renard (1847-1905) à partir de 1879, qui consacre toute sa vie à l'aérostation dirigeable et à l'aviation. Ce que nous voulons souligner c'est le fait que cette institutionnalisation a favorisé cet aspect ainsi qu'une implication plus directe des universitaires en plus des ingénieurs.

15. Cet aspect est mis en lumière par David Aubin dans le cas général de la science en mentionnant comme exemples les cas de l'électricité, le magnétisme et l'astronomie. Elle se trouve dans le rapport Mathematisches Forschungsinstitut Oberwolfach 12/2013 concernant l'atelier de travail *From "Mixed" to "Applied" Mathematics : Tracing an important dimension of mathematics and its history* organisé par Moritz Epple, Tinne Hoff Kjeldsen, et Reinhard Siegmund-Schultze (pag. 697).

dans ce domaine, notamment l'ingénieur mécanique D. Millionshchikov [16] et A.Obukhov [17] [Falkovich 2011].

Dans ce paysage très dynamique, plusieurs sujets de la mécanique des fluides étaient étudiés : les écoulements super-soniques, la théorie de la couche-limite, les fluides visqueux, l'instabilité, la théorie de la turbulence, etc. En ce qui concerne la théorie de la turbulence, l'importance de ce chapitre de la mécanique des fluides accroît progressivement pendant l'entre-deux-guerres grâce aux exigences pratiques de l'époque d'étudier et améliorer les caractéristiques aérodynamiques des profil d'ailes d'avions, de trouver des critères permettant de comparer entre elles les souffleries et de connaitre enfin les efforts auxquels un avion peut être soumis dans l'atmosphère. A partir des années 1920, il devient l'un des sujets les plus étudiés chez la communauté scientifique internationale. La preuve en est que lors de chaque ICAM (Congrès International de Mécanique Appliquée), l'une des conférences générales était dévouée à la théorie de la turbulence. Elle attire l'attention du solitaire Taylor en Royaume-Uni, Jan Burgers, l'école russe de Kolmogorov, l'école allemande de Ludwig Prandtl, et plus tard, en 1930, par celle de Theodore von Kármán aux États-Unis [18]. Et en France ? La littérature secondaire sur l'histoire de la turbulence en France est presque nulle.

L'ouvrage collectif *A Voyage Through Turbulence* [Davidson et. al. 2011], focalisé sur les développements de la théorie de la turbulence 1880-1980, envisage une vingtaine de biographies scientifiques de mathématiciens, physiciens et ingénieurs. Ici, aucune biographie est consacrée à un acteur français. Il s'agit d'un recueil d'une vingtaine de biographies scientifiques de mathématiciens, physiciens et ingénieurs qui ont donné des contributions remarquables à l'étude de la turbulence dans la période 1880–1980, parmi lesquels Reynolds, Prandtl, Taylor, Von Kármán et Kolmogorov. Aucun chapitre n'est consacré à des savants français : dans la préface, les éditeurs regrettent le fait de ne pas avoir pris en compte d'autres

16. M.D Millionshchikov (1913-1973) est un ingénieur mécanique de l'Institut d'Aviation de Moscou qui a collaboré avec Kolmogorov dans des recherches sur la théorie de la turbulence. Nous n'avons malheureusement pas d'autres informations biographiques sur son profil scientifique.

17. Alexandre Obukhov (1918-1989) est à l'époque un mathématicien russe de l'Institut de Géophysique de l'Académie des Sciences de Russie. Après ses études, il accepte un poste à l'Université de Saratov (1935) où il écrit son premier travail mathématique *Theory of correlation of random vectors* qui attira l'attention de Kolmogorov qui lui propose de le joindre au Département de Mathématique de Moscow en 1939. C'est à partir de ce moment que les deux commencent à travailler ensemble sur la théorie de la turbulence. En 1956 il deviendra le premier directeur de l'Institut de Physique Atmosphérique de l'Institut de Geophysique de Moscow.

18. Au contraire de Prandtl, von Kármán et Kolmogorov, Taylor n'a pas constitué une véritable école anglaise autour lui. il n'aimait pas faire de la didactique et il n'a formé que un étudiant, George Batchelor, qui deviendra un grand spécialiste de la mécanique des fluides après la guerre.

spécialistes de la turbulence, dont Kampé de Fériet. De même, dans la préface il s'excuse pour ne pas avoir consacré un chapitre à Kampé de Fériet, lequel vient simplement mentionné de temps en temps [19]. Le chapitre du *Companion Encyclopedia of the History and Philosophy of the Mathematical Sciences* de Grattan-Guinness ([Grattan-Guinness 2002]) consacré à la mécanique des fluides ne mentionne jamais le France, même pour ce qui concerne d'autres problématiques liées à la viscosité d'un fluide.

Le but de chapitre est de montrer, à travers le cas de la turbulence, que l'histoire de la mécanique des fluides en France, a suscité, comme dans les pays voisins, des théories audacieuses capables de suivre une voie plus proche de l'expérience, ce qui a été rendu possible aussi par le progrès des instruments et des dispositifs. En d'autres termes, il s'agira de faire ressortir les trois facteurs (changement d'approche, perfectionnement de l'outillage scientifique et implications des mathématiques/mathématiciens dans les laboratoires) qui marquent ce contexte de rapprochement entre théorie et pratique. Afin de montrer le changement d'approche à la mécanique des fluides et l'implication des mathématiques dans les laboratoires français, nous examinerons le cas de l'école de la turbulence née en France sous l'impulsion de Philippe Wehrlé et Georges Dedebant au sein de la Commission de la Turbulence Atmosphérique, et dont Kampé de Fériet faisait partie jusqu'à la fin des années 1930. Cette école avait élaboré une théorie des fonctions aléatoires très originale à l'époque visant à développer les idées de Taylor et Von Kármán concernant le problème de la turbulence développée. Si les théories de Taylor et Von Kármán avaient toujours traité la vitesse turbulente du fluide comme une fonction continue et dérivable, l'école française supprime cette hypothèse de régularité, en étudiant la vitesse comme une quantité aléatoire, selon un point de vue plus fidèle aux faits réels. En utilisant comme support la théorie cinétique des gaz, Wherle et Dedebant, ont réussi à édifier une théorie "purement" statistique de la turbulence, en partant d'une analyse approfondie des données expérimentales fournies par les expériences en souffleries, les courbes de fréquence et les anémomètres mais aussi par l'atmosphère, afin d'appliquer leurs résultats à la météorologie et à l'aérologie. Kampé de Fériet ne fera pas partie de cette école dans la façon que nous pouvons imaginer. En effet, en tant que mathématicien, il assume un rôle marginal au sein de cette école. Sa contribution théorique est presque nulle. Au contraire, en tant qu'expérimentateur, il donne une contribution remarquable, en ce qui concerne la légitimation de la théorie de Wehrlé et Dedebant à travers les expériences effectuées, en collabora-

19. Il mentionne d'autres spécialistes de la turbulence, notamment Burgers, Klebanoff, S.J. Kline, Kovasznay, Laufer, Liepmann, Lighthill, Loitsianski, Monin, Obukhov, Perry, O.M. Phillips, W.C. Reynolds, Tani, Yaglom, P.Y., etc.

tion avec son équipe de l'IMFL, dans les laboratoires de l'institut. Ensuite, en ce qui concerne le perfectionnement de l'outillage scientifique et l'implication des mathématiques/mathématiciens dans les laboratoires de mécanique des fluides, nous présenterons respectivement le cas de l'ensemble des travaux expérimentaux de l'IMFL visant à perfectionner les essais en souffleries et les anémomètres, le cas de Kampé de Fériet et sa participation active dans les travaux en équipe de l'IMFL concernant la turbulence atmosphérique.

Le chapitre est structuré en cinq sections. Après avoir apporté quelques éléments nouveaux au panorama international des recherches concernant la turbulence, les deuxième et troisième sections se penchent sur la France, respectivement sur la Commission de la Turbulence et l'école de Wehrlé et Dedebant. Ensuite, la quatrième section se focalisera sur les recherches expérimentales de l'IMFL et, enfin, la dernière section se concentrera sur Kampé de Fériet. Là, nous retrouverons l'approche expérimentale avec laquelle il s' était familiarisé pendant la première guerre mondiale.

3.1 La théorie de la turbulence. Une "faille béante"

Les premiers pas vers la théorie de la turbulence [20] furent conduits par des spécialistes comme Boussinesq (1872) et Reynolds (1883), lequels ont essayé d'étudier le problème en utilisant un modèle statistique fondé sur l'existence de "molécules fluides", et l'analyse du mouvement turbulent en deux parties : le mouvement moyen et le mouvement d'agitation. À partir de cette conception, la théorie de la turbulence avait progressé en se rapprochant de l'expérience, sans qu'aucun développement théorique significatif n'advienne durant presque 50 ans.

Cependant, cette période n'est pas purement et simplement vide. Après les travaux de Rayleigh (1888) et Reynolds (1887), plusieurs efforts et débats furent faits autour du problème de la naissance de la turbulence, "the onset of turbulence", considéré comme *le* problème de la turbulence [Bodenschatz et Eckert 2011, 50] avant les années 1920. L'étude du cheminement vers la turbulence s'appuie sur la théorie de l'instabilité en hydrodynamique [21], qui elle-même prend pour objet la recherche de solutions laminaires à de faibles perturbations des équations de Navier-Stokes, afin de mieux comprendre la transition entre le régime laminaire et le régime turbulent. Ce problème fut abordé entre 1900 et 1940 par Rayleigh,

20. Pour une histoire générale de la théorie de la turbulence voir [Farge 1992] et [Farge et Guyon 1999] .

21. Sur les divers débats du XIX^{e} siècle autour de la stabilité dans la mécanique des fluides voir [Darrigol 2002b].

Heisenberg, Orr, Sommerfeld, Hopf, et par Prandtl et ses étudiants entre autres Tollmien, Tietjens, Schlichting [22].

Ce traitement linéarisé fut, toutefois, insuffisant pour aborder le problème de la turbulence lorsque celle-ci est pleinement développée, comme le témoigne Jean Leray dans sa thèse sur l' *étude de diverses équations intégrales non linéaires et de quelques problèmes que pose l'hydrodynamique* (1933). Là, Jean Leray avait montré la perte de la stabilité et de l'unicité de la solution laminaire des équations de Navier-Stokes à partir d'une certaine valeur critique du nombre de Reynolds, au-delà de laquelle les multiples solutions turbulentes avaient un comportement qui n'est plus descriptible que du point de vue statistique. En d'autres termes, l'interprétation de la turbulence du point de vue mathématique de Leray se situe entre les approches qui partent de solutions stables et les perturbent, et les approches de la turbulence développée ; il montre qu'après une certaine valeur, les équations linéarisées ne sont plus capables de décrire le comportement turbulent d'un fluide. Pour l'étude de la turbulence développée il fallait plutôt adopter un traitement statistique reprenant les idées de Reynolds et Boussinesq. Ainsi, les années 1920 marquent le début des méthodes semi-empiriques, qui seront remplacées vers la moitié des années 1930 par la théorie statistique de la turbulence.

En résumé, l'histoire de la théorie de la turbulence est marquée par deux problèmes. Le premier qui part des solutions linéaires des équations de Navier-Stokes et s'appuie sur des bases mathématiques solides, concerne l'étude de l'origine de la turbulence alors que le deuxième, non linéaire, est le problème de la turbulence en plein développement, appréhendé à partir de recherches effectuées à l'aide d'outils statistiques et de nouvelles techniques rendues réalisables grâce aux anémomètres à fil chaud et aux souffleries. Dans cette section nous nous proposons de faire une présentation générale des contributions allemandes, américaines, anglaises et hollandaises au problème de la turbulence développée, en essayant de donner quelques éléments nouveaux par rapport à la littérature existante concernant la théorie statistique de Taylor-Von Kármán.

3.1.1 Les théories semi-empiriques

La théorie semi-empirique constitue le début d'une étude statistique de la turbulence développée. Elle fut inaugurée par Prandtl et Von Kármán pendant les années 1920 dans le cadre de leurs études sur les écoulements turbulents autour d'une plaque plane ou d'une aile d'avion. A l'époque Von Kármán avait

22. Sur le problème de l'origine de la turbulence dans l'école de Prandtl voir [Bodenschatz et Eckert 2011] ; sur Sommerfeld voir sa biographie scientifique dans [Eckert 2013].

quitté l'école de son maître à Göttingen pour se charger de la direction de Institut Aérodynamique de Aachen. La compétition entre les deux, appelé plus tard par von Kármán comme "a kind of Olympic Games", dans le but de déduire une théorie générale de la turbulence est très connue [Bodenschatz et Eckert 2011, 49]. Les premiers progrès théoriques de cette rivalité remontent à 1920-1921, et concernent l'élaboration d'une loi semi-empirique décrivant la distribution des vitesses dans une couche limite turbulente [23] le long d'une plaque plane et lisse. Dans ce contexte, tous les deux arrivèrent à la conclusion que cette loi est proportionnelle a $y^{\frac{1}{7}}$ où y est la distance de la paroi. Quelques années plus tard, cette distribution de vitesse sera étudiée du point de vue expérimental par son élève Johann Nikuradse (1894-1979) [24] et mesurée en soufflerie par Burgers dans son laboratoire à Delft avec ses nouvelles méthodes expérimentales autour des anémomètres à fil chaud.

En 1924-1928, Prandtl reprit les idées de Boussinesq et de Reynolds pour édifier une première théorie véritable de la turbulence fondée sur des méthodes semi-empiriques. Plus précisément, il considéra les équations de Navier–Stokes pour un écoulement turbulent bidimensionnel sur deux plaques dont la vitesse (u, v) est remplacée par sa décomposition de Reynolds $u = \overline{u} + u'$, $v = v'$ et $\overline{u}$ est la valeur moyenne temporelle de la composante selon x de la vitesse, et (u', v') sont les composantes d'agitation de la vitesse respectivement en x et y. Ces dernières constituent l'ensemble des fluctuations rapides (quelques centaines par seconde) et irrégulières de la vitesse autour de la vitesse moyenne $\overline{u}$. Pour ce qui concerne la composante en x de la vitesse, l'équation de Navier-Stokes deviendra :

$$\frac{\partial \overline{p}}{\partial t} + \overline{u}\frac{\partial \overline{u}}{\partial x} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial}{\partial x}\left(P + \overline{\rho u^2} - \mu\frac{\partial u}{\partial x}\right) + \frac{1}{\rho}\frac{\partial}{\partial y}\left(\mu\frac{\partial \overline{u}}{\partial y} - \rho\overline{u'v'}\right) \tag{3.1}$$

Il s'agit des équations de Navier-Stokes pour un mouvement laminaire à la seule différence que, à la viscosité moléculaire $\tau_{visc} = \mu\frac{\partial \overline{u}}{\partial y}$ un terme additionnel et non linéaire est adjoint, c'est à dire la viscosité turbulente (contrainte turbulente de Reynolds) $\tau_{turb} = \rho\overline{u'v'}$. Comment interpréter ce terme additionnel afin de déterminer le profil de vitesse pour un fluide turbulent limité par des parois ? Telle fut la question posée par les méthodes semi-empiriques.

Déjà en 1872, Boussinesq avait essayé de répondre à cette question en s'effor-

23. Sur les travaux de l'école de Prandtl sur la couche limite laminaire et turbulente voir [Eckert 2007].

24. Prandtl lui avait assigné un poste de doctorat pour effectuer des études expérimentales concernant la distribution des vitesses dans un écoulement turbulent.

çant de conserver, pour ce qui concerne les équations du mouvement moyen 3.1, la même forme que les équations de Navier-Stokes pour un mouvement laminaire. Dans ce but, il avait remplacé le terme τ_{turb} par la forme $\left(\epsilon \frac{\partial \overline{u}}{\partial y}\right)$ où ϵ est un coefficient de viscosité turbulente qui ressemble à lui seul toute l'influence de la turbulence. Mais c'est Prandtl qui a fait un lien entre la viscosité turbulente et le terme non linéaire en créant un modèle. En 1925, en reprenant la relation $\left(\epsilon \frac{\partial \overline{u}}{\partial y}\right)$ de Boussinesq, l'ingénieur allemand considère les particules du fluide turbulent comme des molécules en collision dans la théorie cinétique des gaz, en faisant des analogies entre le libre parcours moyen l qui définit la viscosité moléculaire dans la théorie cinétique du gaz et la longueur caractéristique λ de la viscosité turbulente, appelée "parcours de mélange" (*Mischungsweg*), qui définit la viscosité turbulente et les fluctuations transversales de la vitesse des particules. En 1930, Von Kármán développa une expression mathématique en terme de la moyenne temporelle de la vitesse pour la quantité empirique λ dans le cas d'écoulement d'un liquide dans un tuyau lisse ou rugueux, en déduisant une loi logarithmique pour le profil de la vitesse moyenne, en accord avec les expériences de Nikuradse. L'année suivante, il ajoutera à ses résultats l'expression de la vitesse moyenne en fonction de la distance y de la paroi, en discutant les conditions près des parois et à grand nombre de Reynolds, où la viscosité ν peut être négligée.

Taylor avait anticipé ce type de recherches déjà dix ans auparavant, en présentant une théorie du parcours de mélange analogue à celle de Prandtl pour traiter les processus de diffusion de la chaleur et de la quantité de mouvement dans l'atmosphère. Son mémoire, *Eddy motion in the atmosphere* (1915), différait de celle du physicien allemand pour ce qui concerne les hypothèses adoptées. D'après Taylor, c'est le tourbillon qui se conserve lors du passage des particules d'une couche à l'autre et non la quantité de mouvement, comme le supposait Prandtl. Cependant, son article n'eut pas du succès chez ses contemporaines, dont l'attention était dirigée plus vers les problèmes de frottement d'un fluide dans les canaux et tuyaux que vers la turbulence atmosphérique [Battimelli 1986, 17].

3.1.2 La théorie statistique de la turbulence Taylor-Von Kármán

L'approche semi-empirique que nous avons décrite ci-dessus inspirera une théorie moins empirique, acceptée à la fois par les théoriciens et par les expérimentateurs : la théorie statistique de la turbulence. Cette théorie fut inaugurée par Taylor en 1935 et perfectionnée par von Kármán au cours des années suivantes. Nous donnerons ici quelques éléments de cette théorie, en nous focalisant sur ses origines et ses premiers résultats autour de ces deux spécialistes de la mécanique des fluides.

Les idées statistiques de Taylor

Les origines de cette théorie remontent à 1921, date où Taylor publia *Diffusion by Continuous Movements* ([Taylor 1922]). Dans cet article, le physicien anglais abordait le processus de diffusion turbulente, en donnant une interprétation mathématique sur la base du modèle brownien de Wiener et les idées statistiques de Pearson [25]. Plus précisément, Taylor considéra un fluide turbulent supposé incompressible et homogène, de façon à pouvoir avoir des conditions statistiques identiques dans tous les points de l'espace. Sous ces conditions, le mouvement du fluide turbulent est décrit par la trajectoire d'une particule qui bouge à une vitesse uniforme u'. De plus le mouvement de la particule est limité à des déplacements dans une unique direction, à savoir l'axe x. En d'autres termes, si pendant un intervalle t la particule bouge à droite, pendant l'intervalle suivant $t+\xi$ elle peut soit continuer à se déplacer à droite et suivre le même parcours, soit subir une inversion du mouvement (le chocs) et se déplacer à gauche. Ici, le mouvement n'est uniforme qu'entre deux chocs (analogie avec molécules d'un gaz dilué). Sur la base de ces déplacements aléatoires à droite et gauche, nous pouvons constater que la particule du fluide turbulent suit un mouvement brownien à une dimension. Dans ce contexte, il mit en place les idées statistiques de Karl Pearson pour introduire la corrélation entre la composante d'agitation de la vitesse u à un instant quelconque t, (u'_t) et la composante d'agitation de la vitesse de la même particule après un intervalle fini de temps ξ, $u'_{t+\xi}$:

$$R_\xi = \frac{\overline{u'_t u'_{t+\xi}}}{\overline{\sqrt{u^2}}}$$

dont l'écart type de u' est supposé constant sur tous les intervalles de temps. Au moyen de cette relation, Taylor définit la fonction de corrélation R_ξ permettant de relier les fluctuations de la vitesse à l'instant t aux fluctuations de la vitesse à l'instant $t+\xi$ de la même particule. La structure de ces fluctuations conduit alors à traiter les deux composantes d'agitation u'_t et $u'_{t+\xi}$ comme deux grandeurs aléatoires, et à leur appliquer les méthodes statistiques après avoir choisi une définition adéquate des valeurs moyennes (temporelles ou spatiales). En d'autres termes, en utilisant une moyenne temporelle et une description lagrangienne, Taylor introduisit la fonction de corrélation pour étudier l'intensité avec laquelle les fluctuations de la vitesse concernant u'_t présentent une allure très voisine aux fluctuations de la vitesse concernant $u'_{t+\xi}$. Ensuite, c'est à partir de la définition de

25. Il s'agit d'une étude sur la capacité d'un fluide de diffuser des propriétés du fluide comme la température, la chaleur, les fumées, la couleur ou d'autres propriétés qui adhèrent à chaque particule du fluide pendant son mouvement.

la fonction de corrélation et des propriétés statistiques, qu'il déduit à la fois la loi de diffusion exprimant la distribution moyenne des particules après un intervalle de temps ξ et la distance X parcourue par la particule dans l'intervalle T :

$$\overline{u'^2} \int_0^t R_\xi d\xi = \overline{u'_t X} = \frac{1}{2} \frac{d}{dt} \overline{X^2}$$

et

$$\overline{X^2} = 2\overline{u'^2} \int_0^T \int_0^t R_\xi d\xi dt$$

Quoi qu'il en soit, ce travail, publié sur la revue *Proceedings of the London Mathematical Society*, n'attira pas l'attention des spécialistes de mathématiques appliqués à cause de sa nature trop mathématique par rapport aux problèmes de l'époque concernant les canaux et le tuyaux. D'un autre côté les mathématiciens se montrèrent très intéressés à ses travaux, en particulier Norbert Wiener. Ce mathématicien joua un rôle fondamental dans les recherches de Taylor, en lui empruntant les outils mathématiques de son analyse harmonique pour étendre le problème de la note du 1921 au cas à deux dimensions. Au même moment, Wiener trouva, chez les idées de Taylor, une source d'inspiration pour sa théorie sur le mouvement brownien. L'un apportait à l'autre une aide en tant que mathématicien, l'autre en tant que physicien [26].

C'est seulement dans les années 1930 que la contribution de Taylor a connu un large succès, dans un contexte où la typologie des problèmes envisagés et les instruments techniques changèrent profondément. Au début des années 1930, les essais du laboratoire de Prandtl à Göttingen en Allemagne, du National Physical Laboratory (NPL) en Grand Bretagne et du National Bureau of Standards aux États-Unis (NBS), soutenu financièrement par la National Advisory Committee for Aeronautics (NACA), permirent un amélioration des anémomètres à fil chaud, qui sont maintenant capables de suivre les fluctuations de la vitesse sur des fréquences plus hautes (environ 5000 cycles par seconde) et d'effectuer des mesures suffisamment précises des quantités intéressant la fonction de corrélation [Battimelli 1986, 34]. Au même temps, les souffleries arrivèrent à produire une turbulence isotrope artificielle grâce à un système de grilles placé à une distance précise de la source turbulente. [27]. De plus, les corrélations, qui étaient à la base de la théorie de la turbulence de Taylor, pouvaient être mesurées à travers un couple d'anémomètres

26. Sur cette influence réciproque voir [Battimelli 1986, 23]

27. La turbulence est isotrope si les fluctuations de sa vitesse sont, du point de vue statistique, les mêmes dans toutes les directions et dans tous les points d'une section du fluide. La turbulence de grille en soufflerie représente donc un cas idéalisé de turbulence développée qui permet une comparaison entre les résultats théoriques et pratiques [Eckert 2008, 239].

à fil-chaud.

C'est dans ce contexte que Taylor reprit les recherches de sa note de 1921 et il publia la *Statistical Theory of Turbulence* (1935) [Taylor 1935] qui aura un grand impact chez les mécaniciens des fluides des années 1930 et 1940. Dans son article, Taylor utilisa la fonction de corrélation entre deux vitesses en deux points (ou instants) du fluide pour introduire un nouveau concept dans la description statistique du phénomène turbulent, à savoir le concept d'échelle. Dans ce contexte, il envisagea deux définitions d'échelle de la turbulence, temporelle et spatiale, selon que le système de la particule décrivant le mouvement turbulent est lagrangien ou eulérien. Dans le cas d'une description lagrangienne, Taylor définit, à partir de la fonction R_ξ, la longueur :

$$l_1 = \sqrt{\overline{u^2}} \int_0^T R_\xi d\xi$$

laquelle peut être interprétée comme une mesure de l'échelle de la turbulence qui joue, dans la théorie statistique de la turbulence, le même rôle que la longueur λ du parcours de mélange dans les méthodes semi-empiriques de Prandtl. Là, le processus turbulent se manifeste sur une échelle temporelle T qui rend stable la moyenne même alors que les mesures des vitesses d'agitation à un certain instant sont corrélées avec les mesures des vitesses d'agitation des instants plus voisins, en créant une situation analogue à ce qui se passe dans le cas de la mécanique classique. Une fois dépassé cet intervalle de temps, la particule perd sa corrélation avec les autres vitesses aux instants précédents et le processus devient complètement aléatoire parce que les vitesses d'agitation ne sont plus des variables aléatoires corrélées mais indépendantes. Dans le cas eulérien, il considéra la fonction de corrélation R_y entre deux vitesses d'agitation en deux points différents du fluide A et B, c'est à dire u'_A et u'_B :

$$R_y = \frac{\overline{u'_A u'_B}}{\overline{u^2}}$$

Ensuite, il introduit une deuxième longueur qui donne une mesure de l'échelle spatiale à partir de la taille moyenne des tourbillons impliqués dans le processus turbulent :

$$l_2 = \int_0^y R_y dy$$

où y est la distance entre A et B telle que $R_y = 1$ si $y = 0$. L'échelle spatiale de la turbulence est donc définie par le diamètre des tourbillons. Elle joue le même rôle que l_1 dans le cas du système lagrangien : si la distance entre A et B (y)

est plus petite que celle du diamètre du tourbillon, alors une corrélation existe entre u'_A et u'_B. Dans le cas contraire, les deux vitesses seront des variables indépendantes du point de vue statistique. [28]. Toujours dans le même article, Taylor utilisa les propriétés statistiques de la turbulence qu'il venait de définir pour étudier le taux moyen de dissipation de l'énergie, à partir duquel il introduisit une troisième longueur λ qui représente la dimension du tourbillon le plus petit, responsable des processus dissipatifs. Dans le cadre de ce problème, afin d'opérer une simplification et de réduire le nombre d'arguments inconnus dont dépendent les fonctions utilisées, il suppose que le fluide turbulent est isotrope. Afin de vérifier ses résultats théoriques, Taylor avait systématiquement utilisé les données expérimentales des souffleries de la National Advisory Committee for Aeronautics (NACA), fournies par Dryden ainsi que celles des souffleries de Göttingen, Caltech, et du National Physical Laboratory fournies par Simmons et Salter.

Outre la définition de la corrélation, de l'échelle et de l'isotropie, Taylor introduit un autre concept important capable de créer un lien entre la théorie statistique de la turbulence et les expériences : le spectre de la turbulence. La note de 1938, *The Spectrum of Turbulence* [Taylor 1938], apporta une grande contribution du point de vue pratique. Dans cette note, Taylor discuta, à l'aide de la théorie de Wiener, les connexions entre la transformée de Fourier de la fonction de corrélation R_x, obtenue par des mesures simultanées des fluctuations de la vitesse en deux points différents à distance x, et la distribution des fréquences, à savoir le spectre $F(\omega)$, mesuré par les fluctuations temporelles de la vitesse calculée dans un point. Cet objet statistique, permettant la répartition de l'énergie sur toutes les fréquences ω dont chacune correspond à la taille d'un tourbillon, lui permet d'étudier les fluctuations de la vitesse u dans un point en utilisant les composantes harmoniques :

$$R_x = \int_0^\infty F(\omega) \frac{\cos \frac{2\pi\omega x}{U}}{U} d\omega$$

28. Le processus turbulent s'effectue sur différentes échelles de type temporelles et spatiales. En effet, une fois dépassé le nombre de Reynolds critique, il y a un transport continu d'énergie qui va des tourbillons placés dans l'échelle la plus grande aux tourbillons des échelles plus petites. A travers des mécanismes d'interaction non linéaires, les grands tourbillons perdent une certaine fraction d'énergie cinétique vers les tourbillons plus petits des échelles immédiatement inférieures, lesquels vont diminuer progressivement leurs tailles à cause des effets dissipatifs de la viscosité, qui augmentent en écrasant l'énergie cinétique jusqu'à faire disparaitre le tourbillon près de l'échelle la plus petite. Ce discours peut être fait d'un autre point de vue, celui temporel, en prenant comme point de départ l'échelle T, correspondant à l'intervalle de temps où les tourbillons se trouvent dans l'échelle la plus grande. Cette idée, appelé "Cascade d'énergie", a été énoncée par Richardson en 1922, [Benzi 2011].

Si $F(\omega)$ est observé, nous pouvons calculer R_x grâce à :

$$F(\omega) = \frac{4}{U}\int_0^\infty R_x \cos\frac{2\pi\omega x}{U}dx$$

Vice-versa, si R_x est observé, nous pouvons calculer $F(\omega)$ à l'aide de cette formule [Figure 3.1]. Cette relation entre le spectre et la fonction de corrélation sera confirmée par les mesures de R_x et $F(\omega)$ en soufflerie menées par Simmons au NPL. Un résultat analogue sera obtenu également par Dryden en 1937, qui avait étudié le même problème, en obtenant des résultats en accord avec les mesures des anglais [Dryden 1937].

Dans ces circonstances, la théorie statistique de la turbulence de Taylor inaugure un contexte où l'approche même change. L'applicabilité d'une théorie devient un élément essentiel pour les ingénieurs, les physiciens et les mathématiciens, qui commencent à fréquenter les laboratoires d'aérodynamique. Du même coup, c'est la nature du problème qui change. L'étude des fluides non homogènes et asymétriques entre deux parois (ou une seule paroi dans le cas des canaux ouverts) est remplacée par l'étude d'un fluide homogène, isotrope et " libre" (loin des parois). Aux mots "contrainte de cisaillement", "frottement", "influence des parois", "loi de la résistance"," mélange turbulent" s'ajoutent désormais les mots "fonctions de corrélation", "chemin aléatoire", "turbulence isotrope" et "analyse de Fourier" [Battimelli 1986, 32].

La théorie générale de Von Kármán

En 1936, Von Kármán et Leslie Howarth, un étudiant de l'université de Cambridge envoyé à Caltech par Sydney Goldstein à cette époque-là, développèrent une théorie statistique générale de la turbulence isotrope et homogène. En effet, la théorie de Taylor reposait sur des exemples à une seule dimension. Dans le cas d'un écoulement plan, même si le mouvement d'ensemble de la particule est uniforme, nous ne pouvons pas dire la même chose pour le mouvement d'agitation, et il est indispensable d'en donner une théorie cohérente à trois dimensions. C'est dans ce cadre que Von Kármán et Howarth introduisirent, dans leur *On the Statistical Theory of Isotropic Turbulence* [von Kármán et Leslie 1938], le concept de tenseur de corrélation, qui prend en compte les corrélations latérales et longitudinales entre deux vecteurs vitesses dans deux points différents $P_1(u_1, u_2, u_3)$ et $P_2(u_{1+\xi}, u_{2+\xi}, u_{3+\xi})$, séparés par une distance vectorielle r et à un instant donné. Sous ces conditions, ils définirent le tenseur de corrélation **R** comme un tenseur de deuxième rang $R_{i,j} = \frac{\overline{u_i, u_j}}{\overline{u^2}}$ pour $i, j = 1, 2, 3$ qui peut s'écrire dans la forme

suivante :

$$\mathbf{R} = \frac{f(r,t) - g(r,t)}{r^2}\mathbf{rr} + g(r,t)\mathbf{I}$$

où I est le tenseur unité et les fonctions $f(r,t)$ et $g(r,t)$ sont ce qui s'appellent des "fonctions de corrélation double", à savoir des fonctions de corrélation entre u_i et u_j, qui sont les composantes en i et j de la vitesse observées respectivement au point P_1 et P_2. Plus précisément, $f(r,t)$ est la fonction de corrélation pour deux vitesses quelconques unidirectionnelle le long de la ligne P_1P_2 alors que $g(r,t)$ est la fonction de corrélation pour deux vitesses qui se déplacent dans une ligne perpendiculaire à P_1P_2. Ensuite, Von Kármán et Howarth généralisèrent ce concept au cas des trois composantes de la vitesse u_i, u_j, u_k ("fonction de corrélation triple") où u_i et u_j sont les vitesses observées aux points P_1 alors que u_k est observée au point P_2. Leur but était d'appliquer tous leurs résultats à l'équation de Navier-Stokes, afin d'obtenir "l'équation de Kármán-Howarth", encore appelée l'"équation de la propagation de la corrélation" [von Kármán et Leslie 1938, 205]. L'importance de cette équation réside dans le fait qu'elle permet de comparer et confirmer plusieurs propriétés obtenues auparavant par Taylor à propos de la fonction de corrélation, la dissipation de l'énergie et des tourbillons. De plus, l'étude de ses solutions, à petit ou grand nombre de Reynolds, permet de déduire d'autres nouveaux résultats sur la turbulence isotrope pas seulement pour Von Kármán mais aussi pour d'autres spécialistes comme Kolmogorov par exemple [29].

La plupart des résultats seront comparés avec les données expérimentales obtenues par Dryden. De plus, une note de Taylor de 1937, *The statistical theory of isotropic turbulence*, montre que la corrélation entre les deux vecteurs vitesse en deux points prédite par Von Kármán est confirmée par les essais de L.F.G. Simmons dans le National Physical Laboratory. La théorie Taylor-Von Kármán influencera et deviendra une source d'inspiration pour les travaux théoriques de Prandtl, Wiener, Kolmogorov et d'autres physiciens, ingénieurs et mathématiciens. De plus, elle constituera un guide pour des mesures et des essais en soufflerie conduits par les expérimentateurs comme Dryden et ses collaborateurs de la NACA-NBS [30]. Nous verrons dans les sections qui suivront quel est son impact sur l'école française de la turbulence.

29. Sur la contribution de Von Kármán à la théorie statistique de la turbulence voir [Leonard et Peters 2011].

30. Voir l'article de Battimelli [Battimelli 1986, 47] pour la liste des travaux expérimentaux de Dryden qui se sont inspirés de la théorie de Taylor-Von Kármán.

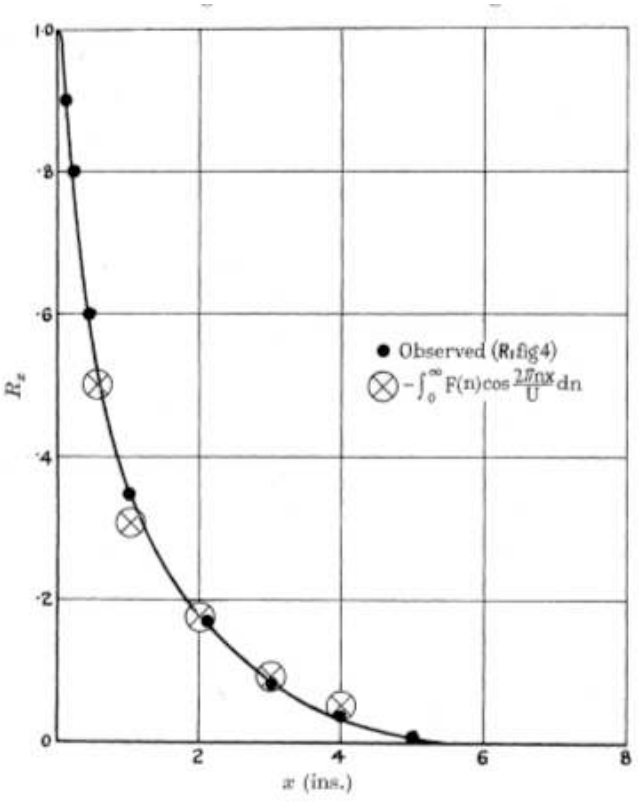


FIGURE 3.1 – Les valeurs de $R(x)$ calculées à partir de $F(\omega)$. Nous pouvons remarquer que les résultats théoriques sont en accord avec les résultats expérimentaux [Taylor 1938, 481].

3.2 La Commission de la Turbulence Atmosphérique (1935-1940)

En avril 1935, l'étude théorique et expérimentale de la turbulence atmosphérique a été confiée par le ministère de l'Air à un groupe de chercheurs, qui constituent une commission présidée par le directeur de l'Office national météorologique (ONM) [31], Philippe Wehrlé [32]. Ses membres comprenaient des collaborateurs de l'ONM, parmi lesquels le directeur de la recherche à l'ONM Georges Dedebant [33] et le sous-chef de Section Technique à l'ONM Albert Baldit, un ingénieur en chef de l'Aéronautique (Paul Dupont) et quelques professeurs de mécanique des fluides, comme Albert Métral, Henri Bénard (institut de mécanique des fluides de Paris), Pierre Idrac (professeur à l'Institut océanographique) [34] et Kampé de Fériet.

Dans l'Arrêté du 27 avril 1935, le ministre de l'Air justifie les raisons de la création de cette commission, en soulignant la nécessité de créer une école française de la turbulence fondée sur une collaboration active parmi différents scientifiques, une école qui, à la différence d'autres nations, était encore absente sur le terrain français :

> "L'étranger a parfaitement compris l'importance de cet ordre de recherches [sur la turbulence atmosphérique et la théorie statistique de la turbulence], témoins les récents travaux parus en Allemagne et en Angleterre notamment, et qui n'ont pas d'homologues en France.

31. L'Office National Météorologique, rattaché au ministère de l'Air à partir des années 1930, fut créé en 1921 afin d'unifier le service météorologique. Sur son histoire depuis sa création, son budget, son activité et son personnel voir [météorologique de France 2011]. Sur une histoire plus générale, du Bureau Central Météorologique à Météo France, en passant par l'ONM et Philippe Wehrlé, voir le livre [Roy 2012].

32. Philippe Wehrlé (1890-1965), ancien élève de l'École polytechnique, fut directeur de l'ONM de 1934 à 1944. Puisque le corps d'ingénieurs de la météorologie n'existait pas encore, il sort de l'École Polytechnique en tant qu'ingénieur de l'aéronautique. En 1921, lors de la fondation de l'ONM, il est nommé chef de la Section des Avertissements et il consacre son activité de recherche au problème de la prévision du temps. Convaincu de l'importance de la météorologie dans le camp de l'aviation, il donne également des cours sur ce domaine à l'École nationale Supérieure de l'Aéronautique. De plus, ses recherches sont marquées par une profonde volonté de mettre de l'ordre dans les sciences météorologiques en vue des applications pratiques dans l'aéronautique. Sur sa vie et sa contribution scientifique voir [Juvanon du Vachat 1995].

33. Georges Dedebant (1902-1965) fut lui aussi un ancien élève de l'École Polytechnique qui sort dans le corps du génie. Avant de devenir, en 1934, directeur de la recherche à l'ONM et responsable de l'enseignement et des travaux pratiques de la météorologie de l'École nationale supérieure de l'aéronautique, il fut chef de la Section de l'ONM au Maroc où il participe à des travaux de climatologie. Sur cet ingénieur voir [Juvanon du Vachat 1995].

34. La collaboration de Pierre Idrac a été interrompue après quelques mois à cause de son décès précoce, intervenu en juin 1935.

> Pour remédier à cette carence, il nous a paru qu'il n'était pas suffisant d'encourager les suggestions individuelles de recherches. [..] Que l'on nous entende bien : il ne s'agit pas de créer une Commission de plus honorifique et "palabrante" ; nous n'employons le mot de "Commission" qu'à défaut d'un terme plus exactement approprié. En réalité, il s'agit d'une association *active* des chercheurs qualifiés se substituant à une poussière d'effort individuels, pour rétablir et tenir à jour un plan détaillé et complet de recherches sur la turbulence atmosphérique, faisant état, bien entendu, des travaux étrangers, et pour poursuivre la réalisation de ce programme de travail jusqu'à aboutissement, en organisant elle-même les recherches et les mesures nécessaires, réparties entre ses membres ou, le cas échéant , confiées à certaines collectivités ou individualités auxquelles elle ferait appel" [Dupont 1938, 2] .

Cette commission s'inspirait de la Wind Structure Committee, une association britannique qui s'occupait de la turbulence atmosphérique dans les régions britanniques [35] [Dupont 1938, 2]. Conscients du retard scientifique et technologique de la France, les membres de la Commission de la turbulence atmosphérique avaient comme objectif de coordonner et d'actualiser les recherches sur la turbulence atmosphérique entreprises en France. Leur idée était de perfectionner la théorie grâce à des applications fréquentes et donc de combler les lacunes assez considérables dans ce domaine. A ce propos, la commission s'engageait à effectuer des études théoriques, des mesures en laboratoire, dans l'atmosphère et en vol, la réalisation du matériel expérimental et les applications à la météorologie et l'aéronautique.

Ainsi, l'aérologie peut-elle être étudiée dans ce cadre grâce à la collaboration entre spécialistes de météorologie et de mécanique des fluides :

> " L'objet propre de la météorologie est l'étude de l'atmosphère à l'échelle synoptique ; au laboratoire de mécanique des fluides, au contraire, on étudie, par exemple, l'interprétation d'un tracé anémométrique correspondant à des perturbations dans les souffleries, des particules d'air dont la dimension va de quelques centimètres à quelques mètres. Entre les deux s'établit la discipline qu'on a pris depuis pour habitude de désigner sous le nom d'Aérologie ; la précision de son échelle correspond à des particules de quelques mètres à quelques

35. Cette commission a joué un rôle fondamental dans les mesures concernant la structure du vent. Ses membres effectuaient leurs essais à Cardington, sur un terrain comprenant sept pôles équipé par des anémomètres de Dines, thermomètres électriques. L'un de ces membres, A. Giblett, publia en 1932 un livre contenant un considérable nombre de données obtenu pendant ces mesures [GIBLETT 1932]. Malheureusement, nous n'avons pas d'autres éléments qui nous permettent de mieux décrire la nature de cette commission. Elle mériterait une plus ample étude.

> centaines de mètres ; des mouvements d'agitation turbulents sur le mouvement moyen défini par cartes synoptiques de la Météorologie ; c'est ce domaine qui constitue le champ d'activité de la Commission de la Turbulence Atmosphérique. " [Kampé de Fériet 1936a, 4]

Le programme des travaux de la Commission était le suivant :

1. étude descriptive de la turbulence
2. étude statistique de la turbulence
3. mécanique de la turbulence
4. applications à la météorologie
5. applications à l'aéronautique

La dernière activité, la plus pratique, était conduite sous la direction de l'ingénieur Dupont et comprenait les recherches aérologiques de l'IMFL et de l'ONM à la Banne d'Ordanche. Dans ce cadre, Kampé de Fériet avait effectué des observations et plusieurs essais en vol, et l'IMFL était en étroite collaboration avec l'ONM, comme nous le verrons dans ce chapitre, à la fois sur le plan des recherches théoriques qu'expérimentales. De plus, à l'IMFL, Wehrlé avait installé sur celui un poste météo, sous la responsabilité d'abord de Jean Sauvegrain et ensuite de Georges Rollin [36]. En revanche, l'Institut de Mécanique des Fluides de Paris ne semble pas prendre part à ces campagnes aérologiques ou collaborer avec l'IMFL et l'ONM ; ses membres s'occupaient plutôt de la réalisation de l'appareillage en laboratoire : Pérès et Malavard avaient mis au point un anémomètre à quartz piézoélectrique qui avait une extrême rapidité de réponse ; Bénard un appareil pour rendre visibles les tourbillons cellulaires et un deuxième appareil pour évaluer le coefficient de la turbulence en un point par correction calorifique [37].

3.3 Wehrlé et Dedebant. Une "école" française de la turbulence

Au sein de la Commission de la Turbulence Atmosphérique, les recherches théoriques avaient suscité la création d'un groupe de recherche autour de Philippe Wehrlé et Georges Dedebant. Ce groupe, bien qu'il était moins connu par rapport aux autres, fut conçu, avec le même esprit que le solitaire Taylor, Burgers, l'école allemande de Prandtl, et celle américaine de Von Kármán. Il s'agit d'un groupe assez hétérogène et varié, hétéroclite, qui comprenait des collaborateurs de

36. Sur ce poste voir le 2^{e}chapitre.

37. À propos des travaux de l'équipe de Bénard, voir l'article de Wesfreid [Wesfreid 2006]. Sur son approche entre la théorie et la pratique et sur ses travaux reliant la cinématographie à la science voir l'article d'Aubin [Aubin 2008–09].

Philippe Wehrlé, notamment G. Dedebant, P. Schereschewsky [38], M. Kiveliovitch mais encore d'autres personnalités étrangères à l'ONM notamment J. Kampé de Fériet, J. Bass [39], J. Moyal [40], R. Failletaz, M. Luntz [41], A. Gião [42] et J. Roulleau [Juvanon du Vachat 1995, 159].

En se référant à ce groupe, est-ce que nous pouvons parler d'une "école" française de la turbulence ? En histoire des sciences le mot "école" est souvent questionné car on risque parfois de tomber sur l'idée naïve : "ensemble d'étudiants (doctorants) et leur maître". Plusieurs historiens ont essayé de lui donner une définition en lui associant le concept de laboratoire et le travail expérimental entre

38. Leon Philippe Schereschewsky (1892-1980) est un ancien élève de l'École Polytechnique et de l'École des Mines. Mobilisé en 1914, il dirigera le Service Météorologique des Armées. Après la guerre, il fera partie de l'ONM où il donnera des contributions importantes en météorologie dynamique et dans l'émergence de la prévision numérique.

39. Jean Bass (1913-2007) fut un ancien élève de l'école Polytechnique (classe 1932). Après une année à l'Ecole de l'Air (Versailles), en 1935 il entrera à l'École Supérieure Aéronautique et en même temps il s'inscrira en licence de mathématiques à l'université de Paris où il passera le certificat de licence de Géométrie, enseigné par E. Cartan à l'époque. En 1945 il fut mis à la disposition de l'Institut de Mécanique des Fluides de Paris et en 1948 il soutiendra une thèse avec un jury composé par le statisticien Darmois, Villat et le physicien L. de Broglie. En 1951, il succède alors à Paul Lévy en 1951 comme professeur de mathématiques à l'École nationale supérieure des mines de Paris, et pour une année universitaire de 1953 à 1954, est professeur à l'école nationale supérieure de mécanique à Nantes. De 1954 à 1968, il assurera des cours de mathématiques à l'École supérieure d'aéronautique où il restera jusqu'en 1968. Ses cours de mathématiques furent publiés en plusieurs tomes et volumes, et donnèrent un nouvel élan à la formation des ingénieurs, en introduisant dans un cours d'ingénierie des nouveaux concepts comme l'intégrale de Lebesgue et le calcul tensoriel. En 1971, il deviendra professeur aussi à l'université de Paris. Ses contributions tournent autour des fonctions pseudoaléatoires et leurs applications dans la théorie de la turbulence.

Je tiens à remercier Jean Dhombres pour les informations biographiques sur Jean Bass.

40. José Enrique Moyal (1910-1998) fut un physicien australien, spécialiste en ingénierie aéronautique et dans l'étude des connexions entre statistique et mécanique quantique. Après sa première formation à Tel Aviv, il s'installera à Paris où il suivra des cours à l'École Supérieure d'Electricité, à l'Institut de Statistique, et à l'Institut Henri Poincaré. C'est dans ce contexte qu'il rencontre Wehrlé et Dedebant. Après la guerre, il deviendra professeur de mathématiques à l'Université de Macquarie à Sidney.

41. Michel Luntz (1909- ?) est un physicien russe, il travaille dans l'équipe de Bernard à l'Institut de Mécanique des Fluides de Paris, entre 1931 et 1937 et entre 1938-1939 à l'ONM. Après des années de captivité pendant la guerre, il fera partie de l'ONERA. Sur ce physicien voir [Wesfreid 2006].

42. António Gião (1906-1969) fut un physicien portugais spécialiste en météorologie et géophysique. Après ses études à l'Université de Coimbra, il décide de passer des années à l'Institut de Physique du Globe de Stasbourg et ensuite à Paris l'ONM où il entreprendre des collaborations professionnelles avec Wehrlé et Dedebant en ce qui concerne la théorie des perturbations en météorologie. Suite à la guerre, il rentrera en Portugal, à l'Université de Lisbonne.

professeurs (fort pouvoir institutionnel) et étudiants (John Morrell [Morrell 1972]) qui interagissent entre eux de façon continue, sociale et intellectuelle (Gerald L. Geison [Geison 1981]). Cette définition s'est développée dans le temps ; l'historien John Servos, par exemple, donne un aperçu de ces définitions dans [Servos 1993]. D'après l'historienne des mathématiques Karen Parshall, la définition d'école en histoire des sciences n'est pas toujours applicable en histoire des mathématiques. En effet, dans ce dernier cas, cette définition ne peut pas être toujours associée au développement d'un laboratoire scientifique, ce qui la mène à proposer une nouvelle définition en ce qui concerne une école de recherche mathématique [Parshall 2004]. Selon sa définition, les membres d'une école ne sont pas nécessairement les doctorants d'un maître, l'important c'est que tous partagent la même approche commune. Par exemple, d'après la définition de Parshall, l'école de Noether peut être définie comme une école même si ses membres ne sont pas des étudiants de Noether mais des personnes qui font partie de son milieu, et même si Noether n'a pas un pouvoir institutionnel fort en divergeant, pas suite, de la définition de Morell.

Dans le contexte du groupe autour de Wehrlé et Dedebant, la question est compliquée car dans ce cas il y a à la fois des théoriciens et des expérimentateurs qui interagissent dans le même contexte institutionnel, la Commission de la Turbulence dont Wehrlé est le président et qui disposent de laboratoires scientifiques (ONM, IMFL et Institut de Mécanique des Fluides de Paris). Dans ce sens-là, elle semble s'inscrire dans les définitions proposée par les historiens des sciences. Au même temps, cette école pourrait aussi être définie dans le sens de Parshall car ses membres ne sont pas nécessairement des étudiants de Wehrlé et Dedebant, mais des collaborateurs de l'ONM et d'autres étudiants ou professeurs provenant d'autres instituts qui développent les idées théoriques de Wehrlé et Dedebant en partageant la même approche fondée sur un point de vue statistique de la théorie de la turbulence. Malgré les difficultés d'insérer cette école dans l'une ou l'autre définition, tous ces éléments nous incitent à utiliser le mot école pour désigner le groupe de recherche qui s'est constitué autour des deux polytechniciens.

Leurs idées sont exposées dans une série de publications et de cours, pour la plupart parus entre 1934 et 1945 et consultables dans la bibliothèque de Météo France [43]. Ce qui distingue cette école est la circulation de leurs idées. En examinant la bibliographie des autres écoles, entre autres celles anglaise et américaine, nous pouvons remarquer qu'elle contient très peu de livres consacrés à la turbulence [Davidson et. al. 2011]. Pour la plupart, il s'agit de mémoires et conférences

43. J'en profite pour remercier le responsable de la bibliothèque de Météo France de Paris, Pierre Paillot, pour l'aide apportée dans la recherche des publications de Wehrlé et Dedebant.

parus dans des périodiques impliquant l'entière communauté internationale de mécanique des fluides autour des ICAM. En revanche, la bibliographie de l'école française comprend quelques livres ([Wehrlé 1956, 460 pages]) ainsi que de longs articles de 50 à 100 pages dans la même revue ([Dedebant et Wehrlé 1944a] et [Dedebant et Wehrlé 1944b]) à côté d'autres formes de publication, notamment des exposés didactiques, des conférences, de notes envoyées à l'Académie des Sciences et à la revue *la Météorologie*. A l'exception de la communication tenue lors de l'ICAM 1938 aux États-Unis grâce à Kampé de Fériet, il semble que leur théorie soit bornée à une circulation nationale, destinée surtout au milieu de la météorologie, ce qui a eu pour effet d'en constituer une théorie non suffisamment comprise ou partagée parmi la communauté internationale de mécanique des fluides. De puis, une vue d'ensemble détaillée de leur théorie se trouve dans l'œuvre de Jean Bass [Bass 1946] consacré au rôle des théories modernes du calcul des probabilités et statistique mathématique dans l'étude de la turbulence des années 1930-1940 [44].

Cette section est consacrée à la présentation des idées de l'école de Wehrlé et Dedebant développées entre 1934 et 1940. A ce propos, la section est structurée en quatre sous-sections. Les premières trois sous-sections analysent d'abord leur ré-interprétation en langage purement statistique des théories semi-empiriques de Prandtl et von Kármán (première sous-section) et ensuite de la théorie de la turbulence développée de Taylor-von Kármán (deuxième sous-section) et de l'étude des équations de Navier-Stokes (troisième sous-section). Dans ce contexte, nous allons approfondir la deuxième sous-section puisque c'est dans leur ré-interprétation de la théorie de Taylor-von Kármán que nous pouvons retrouver les idées originales de leur théorie, fondée sur la notion d'étage de perturbation (qui généralise le concept d'échelle du cas de la turbulence en soufflerie au cas plus complexe de la turbulence atmosphérique) et le caractère aléatoire de la turbulence d'un fluide comme une propriété fondamentale dans le domaine de la météorologie et de la turbulence atmosphérique. Là, nous montrerons que les fluctuations de la vitesse seront traitées comme des champs aléatoires définis à partir des courbes de fréquences et non plus par des courbes régulières comme chez leurs prédécesseurs, ce qui permet de donner une justification de leur théorie "purement statistique" sur le plan expérimental. Le calcul stochastique se fondera sur le concept de dérivée aléatoire du mathématicien russe Slutsky, à partir duquel ils développeront une analyse aléatoire visant à étendre les règles de calcul de l'analyse classique. Nous mettrons en lumière le fait que ce sont des conceptions statistiques données par l'expérience et les courbes de fréquences qui définissent leur concept de fonction aléatoire plutôt que les théories rigoureuses des fonctions aléatoires

44. Ce traité, destiné aux ingénieurs de l'aéronautique, fut rédigé sous la demande du Groupement des Recherches Aéronautiques Française (GRA) entre 1941 et 1943.

des mathématiciens Wiener ou Kolmogorov. Nous verrons que le support de leurs idées ne sera pas le calcul des probabilités, mais la théorie cinétique des gaz et les distributions statistiques de chacune des propriétés scalaires du fluide [45].

Enfin, dans la dernière sous-section nous passerons de ce plan théorique à celui expérimental pour montrer que leurs idées visant à donner une approche purement statistique à la théorie de Taylor-von Kármán sont en accord avec les données expérimentales obtenues dans les laboratoires de l'IMFL, qui à l'époque collaborait avec l'ONM dirigé par Wehrlé dans le cadre de la Commission de la Turbulence Atmosphérique. A ce propos, nous mettrons l'accent sur le rôle fondamental que Kampé de Fériet jouera au sein de cette école, dans la collaboration avec son équipe visant à donner une légitimation expérimentale de leur théorie. Cette théorie montre un exemple français de la nouvelle approche théorique-pratique du problème de la mécanique des fluides inaugurée par Prandtl, Taylor et Von Kármán.

3.3.1 Une approche "purement statistique"

Les premiers travaux de Wehrlé et Dedebant remontent à 1934, un an avant la publication de la célèbre note de Taylor sur la théorie statistique de la turbulence. Dans le même esprit que Prandtl et Von Kármán, les premières recherches se penchent sur des problèmes concernant l'écoulement des fluides turbulents au voisinage d'une paroi. Ce qui change est l'approche. Prandtl et von Kármán avaient utilisé des méthodes empiriques alors que Wehrlé et Dedebant adoptèrent un point de vue qui définissent comme "purement statistique", différent aussi de celui de Taylor parce qu'il s'appuie sur la théorie cinétique des gaz. Au contraire des méthodes semi-empiriques de Prandtl et von Kármán, leurs travaux ne se fondent pas sur des analogies entre le mouvement d'agitation turbulent et la théorie cinétique des gaz. Plutôt, cette dernière constitue son *support*, ce qui leur permet d'aboutir à une théorie plus générale incluant la description de la turbulence et le contexte des équations de Clausius et Boltzmann.

Dans le mémoire envoyé à l'Académie des Sciences, *Sur la similitude statistique dans les mouvements turbulents des fluides* [Dedebant et. al. 1934], Wehrlé, Dedebant et Schereschewsky écrivent :

> "Il paraît d'un grand intérêt d'adopter dans la théorie de la turbulence, un point de vue résolument statistique, c'est à dire de poser une "*décoordination*" complète dans l'espace et dans le temps du mouvement

45. Sur l'histoire de la théorie cinétique des gaz voir par exemple [Barberousse 2002] ainsi que les publications de Stephen G. Brush.

> perturbé. Ainsi conçue, la théorie de la turbulence peut être calquée sur la théorie cinétique, abstraction faite de ce qui dépend du phénomène des chocs".

D'après eux, les propriétés du mouvement turbulent ne doivent pas être entre les vitesses de différents points du fluide mais entre les lois de distribution statistiques des vitesses en ces points. C'est cette loi qui est la principale source de renseignements sur la structure du champ de vitesse turbulent. Plus précisément, étant donnée une turbulence d'échelle T, la fonction de distribution $f(u', v', w')$ est la loi statistique selon laquelle les fluctuations de la vitesse turbulente (u', v', w') en un point P se distribuent pendant un temps T, défini comme la période de temps sur laquelle les moyennes de (u', v', w') sont nulles (ce qui traduit bien que T est l'échelle de la turbulence considérée). Cette loi est supposée ne s'écarter que peu de la loi de distribution de Maxwell :

$$f(u', v', w') = f_0(u', v', w')e^{-\frac{\epsilon}{\sigma^2}} \tag{3.2}$$

où σ est leur écart type tel que $\frac{\sigma^2}{2}$ est l'énergie cinétique moyenne d'agitation, ϵ est l'énergie dissipée dans la particule (taux de dissipation), et f_0 est la fonction de distribution de Maxwell correspondant à l'état d'équilibre moyen du fluide :

$$f_0(u', v', w') = \frac{1}{(\sqrt{2\pi}\sigma)^{\frac{3}{2}}} e^{-\frac{u'^2+v'^2+w'^2}{2\sigma^2}}$$

Dans leur note, ils se proposent de remplacer le principe de similitude de Von Kármán par une "similitude purement statistique". Selon le principe de Von Kármán, dans un écoulement dont les lignes de courant sont parallèles, les moyennes des composantes d'agitation (par exemple le terme $\overline{u'v'}$) des vitesses seraient identiques si ces dernières sont faites sur un changement d'échelle de temps approprié (changement du temps d'observation T), variable en sorte que le mouvement d'agitation est organisé partout dans la même manière. Ainsi, ils veulent montrer que "les relations de Von Kármán, et celle plus classique encore de Prandtl, s'obtiennent en écrivant seulement que les lois de distribution de vitesses perturbées deviennent identiques par un certain changement d'échelle". A travers ce principe, ils remplacent le concept de "moyenne des vitesses" avec celui de "fonction de distribution des vitesses", ce qui "implique une hypothèse beaucoup plus large que celle de Von Kármán".

Dans le détail, ils considèrent un écoulement quasi-permanent à deux dimensions dont $U(y), V = 0$ sont les composantes de la vitesse d'ensemble et u', v' les composantes de la vitesse turbulente, dont les moyennes sont nulles sur un temps τ. En vue de comparer les fonctions de distribution $f(u', v', y)$ aux différents points

du fluide, ils supposent que le nombre N des fluctuations mesurées est le même en chaque point, ce qui veut dire que le temps d'observation τ doit être variable de point en point. Là, τ devient alors le temps nécessaire pour que dans chaque point, on observe le même nombre de fluctuations N. Puis, ils construisent leur principe de similitude statistique, en imposant que les surfaces de distribution des vitesses $\phi(u,v,y)$ - déduites de f (ϕ n'est que la fonction obtenue par adimensionnement de la fonction f) avec $u = \frac{u'}{\sigma}$, $v = \frac{v'}{\sigma}$ - soient identiques aux premier et deuxième ordres de son développement autour d'une quantité qui dépend de $\eta = \frac{\epsilon}{\sigma}$. Cela se traduit par le fait que les termes du premier ordre de η sont indépendants de y. A partir de ce principe de similitude et d'autres considérations empruntées à la théorie cinétique des gaz et l'analyse dimensionnelle, ils montrent que les deux termes du premier ordre sont :

$$\tau U' = \text{const}, \qquad \sigma\tau' = \text{const} \tag{3.3}$$

où les constantes dépendent des caractéristiques du fluide et des parois qui le limite. Enfin, à partir de la définition du changement d'échelle :

$$\tau \approx \frac{1}{U'} \qquad \sigma \approx \frac{1}{\tau'} \approx \frac{U_0'^2}{U_0''} \tag{3.4}$$

ils retrouvent les expressions de Prandtl et de Von Kármán du parcours moyen λ, du coefficient d'échange turbulent et de la force de frottement.

Dans une deuxième note publiée l'année suivante, les deux relations 3.3 et 3.4 seront obtenues par une voie différente [Dedebant et. al. 1935]. Il s'agit de la méthode fondée sur *le maximum de probabilité*, à savoir une application du théorème de Liouville au cas de la turbulence qui prend en compte la probabilité $\overline{\omega}$ de la configuration au point y pour un volume de fluide composé de N particules passant par ce point, définie par une fonction de distribution f qui dépend de la vitesse turbulente (u', v', w') et des coordonnées des particules (ξ, η, ζ). Dans ce cadre, ils retrouvent une troisième relation qui conduit à la loi logarithmique de distribution de la vitesse d'un écoulement turbulent le long d'une paroi.

En un mot, nous avons vu comment les problèmes semi-empiriques de Von Kármán et Prandtl sont abordés avec une approche complètement différente. Comme chez les spécialistes allemands et américaines, ces investigations théoriques ont donné lieu à des vérifications numériques et à des essais en soufflerie qui montrent un accord avec l'expérience. L'arrivée de la théorie statistique de Taylor en 1935 marquera la fin de ce type de travail. En effet, à partir de ce moment-là, ils dirigeront leur approche purement statistique vers la nouvelle théorie du phy-

sicien anglais à laquelle ils donneront une ré-interprétation originale fondée sur le concept d'étage de perturbation et un point de vue aléatoire de la fluctuation de la vitesse.

3.3.2 Une théorie légitimée par l'expérience

Le rôle du concept d'échelle

Dans la théorie Taylor-Von Kármán, ce sont les "particules" composant le fluide et leur mouvement d'agitation qui caractérisent la turbulence. A cette époque-là, cette définition était encore peu précise et nécessitait une plus ample explication. Dans ce contexte, Wehrlé et Dedebant se sont posés la question suivante :
la notion de particule a t-elle une signification physique ou cette notion, au contraire, est-elle une simple commodité mathématique ?

Dans la recherche d'une réponse, ils avaient fortement insisté sur le rôle d'échelle en mécanique des fluides et en météorologie, qui les avait conduit à réfléchir plus profondément sur cette notion et sur son lien avec l'échelle de la turbulence définie par Taylor, en découvrant par la suite les étages de perturbations [Dedebant et Wehrlé novembre 1938], [Dedebant et Wehrlé 1935], " qui seuls permettent d'introduire ordre et clarté dans l'interprétation des faits expérimentaux" [Kampé de Fériet 1937b, 377]. En d'autres termes, ils donnèrent à la notion d'échelle et de particule utilisée par Taylor une conception météorologique en permettant de lui donner un sens physique. Au contraire de la turbulence en soufflerie, l'atmosphère, considérée dans son ensemble comme un milieu unique, a l'avantage de présenter une gamme d'échelles visiblement plus étendue. A chaque définition de l'échelle correspond un certain niveau de turbulence et un découpage de l'atmosphère en domaines élémentaires, chacun doté d'une certaine valeur constante de température, pression, vitesse, densité, énergie cinétique, etc. Les mesures faites avec des instruments, dont la précision est adaptée à cette échelle, doivent donner des résultats constants dans chaque domaine élémentaire.

D'après Wehrlé et Dedebant, ce sont ces domaines élémentaires qui jouent le rôle de "particules" d'un fluide. En passant d'une échelle à celle immédiatement inférieure, la situation devient de plus en plus complexe : chaque domaine élémentaire (ou particule) de l'échelle précédente se décompose à son tour en d'autres domaines élémentaires. L'échelle la plus grande est l'atmosphère du globe, dont les distances et durées sont relativement considérables par rapport à l'échelle humaine. Les mouvements de l'atmosphère définissent la *circulation générale* laquelle est différenciée par la troposphère, la stratosphère, les fronts polaires etc. Immédiatement au-dessous, se place *l'échelle synoptique* dont les domaines élémentaires,

les *particules synoptiques*, sont des masses d'aire relativement bien définies à savoir les perturbations, les cyclones et les anticyclones. Ces domaines élémentaires sont considérés comme des particules en mouvement d'agitation turbulente par rapport au calme de la circulation générale qui joue le rôle de mouvement d'ensemble. A cette échelle de turbulence qui vient d'être définie, Wehrlé et Dedebant font correspondre la définition d'*étage de perturbation*. A chaque étage de perturbation, la vitesse d'une particule sera la somme de la vitesse d'ensemble (vitesse d'agitation de l'étage supérieure) et de la vitesse d'agitation. Le dernier étage de perturbation est celui où les particules coïncident avec les molécules : c'est le chaos moléculaire de la théorie cinétique des gaz.

Jusqu'à ce moment-là, Taylor, Von Kármán, Prandtl et les autres aérodynamiciens travaillant en soufflerie avaient tendance à n'accepter qu'un seul étage de perturbation, entre le mouvement moléculaire et le mouvement uniforme d'ensemble qui était décrit par les équations de Navier-Stokes d'un mouvement laminaire. Ce concept montre comment leur théorie ne concerne pas seulement la turbulence en soufflerie limitée aux fluides incompressibles comme chez Taylor et Von Kármán, mais, en envisageant le cas de la turbulence atmosphérique, ils conférèrent à leurs recherches un caractère plus général, dans le but d'appliquer les résultats obtenus à la météorologie.

Afin de montrer concrètement la validité de leur raisonnement, ils utilisèrent comme support la théorie cinétique des gaz et le point de vue eulérien dans l'étage de perturbation entre le chaos moléculaire et le mouvement moyen accessible aux équations de Navier-Stokes. Dans ce contexte, un anémomètre permettait d'avoir à disposition une moyenne sur les vitesses des molécules passant pendant un intervalle de temps Δt dans un volume $\Delta\omega$ entourant un point P. Là, le procédé statistique utilisé pour confronter les propriétés du mouvement d'ensemble et celles de ses sous-ensembles, à savoir les mouvements d'agitation, fut le crible. Plus précisément, sous l'hypothèse que le fluide est en mouvement stationnaire [46], ils subdivisèrent un intervalle de temps relativement long en fractions de durée $\frac{T}{2}$ numérotées $1, 2, .., n$ et ils groupèrent d'un côté les intervalles de numéros impairs et de l'autre côté de numéros pairs. Ils montrèrent alors que si les deux moyennes des vitesses moléculaires calculées sur tous les intervalles pairs d'une part et tous les intervalles impairs d'autres part, sont identiques, alors leur valeur est égale à la moyenne générale calculée sur un intervalle très long quelconque. Au contraire, si les deux moyennes sont distinctes, alors le procédé du crible révélera l'existence d'une échelle supérieure correspondant à une turbulence d'échelle T, c'est à dire

46. Un mouvement est stationnaire si la moyenne des vitesses $(\overline{u}, \overline{v}, \overline{w})$ pour un intervalle de temps assez long a une valeur constante quel que soit cet intervalle.

à un étage de perturbation T. D'après cette définition, le spectre de la turbulence est l'ensemble de tous les étages de perturbation $T_1, ...T_k$.

Les variables aléatoires dans la description du phénomène turbulent

Outre le concept d'étage de perturbation, "le pas en avant" [Kampé de Fériet 1937b, 388] qu'a impulsé l'école française à l'étude de la turbulence consiste en la description du phénomène turbulent à travers l'introduction d'un champ de variables aléatoires. En d'autres termes les fluctuations de la vitesse turbulente sont traitées par Wehrlé et Dedebant comme des variables aléatoires. Plus précisément, soit ξ une propriété quelconque du fluide (pression p, température θ, vitesse (u, v, w), densité ρ etc.) et $\overline{f(P)}$ la valeur moyenne au point P sur tous les intervalles de temps de durée $\frac{T}{2}$ (que nous numérotons $1, 2, .., n$) qui fractionnent un intervalle de temps très long tel que $\overline{\xi(P)}$ garde la même valeur quel que soit cet intervalle choisi (mouvement stationnaire). A l'aide d'un instrument capable de faire une moyenne sur la durée $\frac{T}{2}$ (correspondant à l'étage de perturbation considéré), à chacun des intervalles de durée $\frac{T}{2}$, les valeurs de $\xi(P)$ mesurées obtenues seront :

$$\xi_1(P), \xi_2(P)...., \xi n(P)$$

où pour chacun de ces valeurs ξ_k sera appliquée la décomposition de Reynolds :

$$\xi_k = \overline{\xi(P)} + \xi'_k(P)$$

C'est dans ce contexte que l'école de Wehrlé et Dedebant introduit son idée originale à la théorie statistique de Taylor-Von Kármán afin de conserver la nature aléatoire de la turbulence même, ce qui est plus conforme à l'expérience. À partir de Boussinesq et Reynolds, les théories précédentes, y compris celles de Taylor et Von Kármán, avaient étudié $\xi'_k(P)$ comme une fonction régulière, en préservant ses propriétés de continuité et de dérivabilité et en niant par la suite le caractère aléatoire de la turbulence. En revanche, les membres de l'école française construisirent une théorie qui ne repose plus sur cette hypothèse. En effet, ils traitèrent les composantes d'agitation $\xi'_k(P)$ comme des variables aléatoires qui ne seront connues que par des courbes de fréquence et par des équations contenant les paramètres statistiques de ces courbes [47] :

> "Nous nous refuserons désormais à traiter les composantes d'agitation f' [48] autrement que d'un point de vue *statistiquement pur* : nous

47. Naturellement, la composante moyenne $\overline{\xi(P)}$ sera étudiée de la même manière que les prédécesseurs de Wehrlé et Dedebant, à savoir en tant que champ moyen stationnaire décrit par une fonction continue et dérivable de x, y, z.

48. Cette citation de Kampé de Fériet utilise la notation f au lieu de ξ pour indiquer une

> renoncerons dans la théorie à toute connaissance individuelle des f', nous ne les traiterons plus que comme des *variables aléatoires ; nous pulvériserons complètement la chronologie du mouvement* n'attachant plus aucune importance à l'instant (numéro k) où telle valeur f'_k est réalisée mais seulement à sa fréquence dans l'ensemble. " [Kampé de Fériet 1937b, 380]

C'est l'étude expérimentale de la structure des éléments météorologiques qui les avait menés vers l'idée que les fonctions ordinaires de l'analyse étaient absolument impropres à représenter les phénomènes naturels. En second lieu ce qui change est l'ensemble des règles du calcul de la moyenne d'une propriété du fluide. Taylor, Von Kármán et les autres prédécesseurs avaient toujours utilisé l'intégrale de Riemann pour calculer $\overline{\xi}$, c'est-à-dire la moyenne temporelle d'une propriété du fluide ξ. Wehrlé et Dedebant, en reprenant le problème à sa base, au lieu du calcul riemannien de la moyenne, avaient remplacé cette intégrale avec celle de Lebesgue, "qui élimine toute idée de succession chronologique et permet de dériver sous le signe $\int$ les fonctions de distributions en un point jouissant des propriétés de continuité et dérivabilité retirées aux variables physiques" [Dedebant et Wehrlé 1938, 1791] :

$$\overline{\xi} = \int \xi F(\xi/P) d\xi$$

où $F(\xi/P)$ est la fonction de distribution de l'élément ξ au point P et le domaine d'intégration correspond à l'espace des fréquences statistiques.

En d'autres termes, Wehrlé et Dedebant ont renouvelé la théorie de la turbulence de Taylor-von Kármán en supposant, ce qui est plus conforme à l'expérience, que la vitesse des particules est une fonction aléatoire du temps et de l'espace. D'après eux tous les éléments météorologiques sont des fonctions aléatoires dont la description logique nécessite deux valeurs : une de moyenne $\overline{X}$ (les *valeurs probables*) et une d'écart (ou dispersion) $\sqrt{\overline{X'^2}}$, les moments statistiques de premier et du deuxième ordre qui sont des fonctions non aléatoires. Chaque élément météorologique doit donc être décrit par ces deux paramètres statistiques, qui sont obtenus par différents instruments très fins opérant par pointé comme le dépouillement micro-photométrique d'une plaque fixe impressionnée par un spot lumineux commandé par l'organe sensible [Dedebant et Wehrlé novembre 1938, 33c].

propriété du fluide.

Des courbes régulières aux courbes de fréquence

Dans le cadre de cette traduction de la turbulence en langage aléatoire, un rôle important est joué par le concept de courbe de fréquence. Les courbes de fréquence se montrent en effet plus efficaces que les courbes régulières dans la justification sur le plan expérimental du point de vue purement statistique de Wehrlé et Dedebant . Plus précisément, d'après Wehrlé et Dedebant, ce sont les courbes de fréquences, et les moyennes qui s'en déduisent, qui justifient leur théorie et qui donnent principalement les renseignements sur ξ qui viennent de l'expérience. Là, la loi de distribution $F(\xi/P)$ peut être vue alors comme une courbe de fréquence. Pour ce qui concerne la vitesse par exemple, le champ de vitesse est un champ de variables aléatoires, plus précisément de fonctions aléatoires du temps. Dans ce contexte, les mesures du champ des vitesses sont effectuées en plaçant les anémomètres en un certain nombre de points fixes (système de variables eulériennes). Cependant, en opérant par pointés, ces techniques ne permettent pas un enregistrement continu des vitesses, et l'ensemble des points enregistrés couvrant une certaine région du plan rend impossible le fait de tracer un ordre chronologique de la succession de ces points. Le seul procédé pour leur dépouillement est donc le dénombrement statistique (direct ou photométrique) et son résultat immédiat est une courbe de fréquence. En généralisant ce raisonnement au cas plus complexe de l'atmosphère, ils construisirent la courbe aux voisinage d'un instant t, en choisissant un intervalle de temps autour de t qui soit assez court pour considérer le fluide permanent et assez long pour calculer l'évolution des fréquences.

Dans le cas de la vitesse u définie sur un système de variables lagrangiennes par exemple, l'intégrale $\overline{u} = \int_{t-T}^{t+T} u(s)ds$ n'est pas en général intégrable au sens de Riemann à cause de la complexité de la courbe $u(s)$. C'est pourquoi Wehrlé et Dedebant décidèrent de procéder par la méthode du dénombrement où la vitesse est décomposée par les points $u_1, u_2, u_3, ...$ Là, ils mesurent le nombre n_i de fois où, dans la durée $2T$ relativement grande par rapport à l'instant t, la vitesse enregistrée a été comprise entre u_i et u_{i+1}. Si le nombre total de points des vitesses est $N = \sum n_i$, on peut dresser un tableau des fréquences $\sum \frac{n_i}{N}$, c'est à dire une courbe donnant les fréquences en fonction de la vitesse. En conséquence, la valeur moyenne de u sera calculée par la formule :

$$\overline{u} = \sum \frac{n_i}{N} u_i'$$

si u_i' est une valeur comprise entre u_i et u_{i+1}, par exemple $\frac{1}{2}(u_i + u_{i+1})$. Cette formule n'est qu'une intégration approchée au sens de Lebesgue, inférée à partir de

l'expérience [49].

Ainsi, sans recourir aux définitions de fonction aléatoire de Wiener ou de Kolmogorov, ils définissent le champ d'une fonction aléatoire $X(t)$ par une autre voie, à travers la courbe de fréquence $F(\xi/P)$ et la fonction de corrélation entre deux points P et Q du champ. La première est la probabilité tel que :

$$\xi < X(P) < \xi + d\xi$$

alors que la deuxième est la courbe de fréquence $G(\xi/P, \eta/Q)$ ou bien la probabilité que simultanément on ait :

$$\xi < X(P) < \xi + d\xi, \ \eta < X(Q) < \eta + d\eta$$

Le concept de "courbe" et de "chronologie" de Taylor et Von Kármán sont alors remplacés par "variable aléatoire" et "fréquence" et la fonction aléatoire peut être représentée par un ensemble de points [50]. Cela est un exemple montrant leurs efforts peut justifier leurs idées sur le plan expérimental. Malheureusement, nous n'avons trouvé aucun document permettant de développer cette partie expérimentale. Tous ce que nous avons trouvé se trouve dans l'œuvre de Jean Bass [Bass 1946].

Dans la sous-section suivante, nous montrerons quel est le rôle de l'IMFL dans le cadre de la légitimation de leurs idées. A propos des courbes de fréquence, nous verrons que Kampé de Fériet et son équipe collaboreront avec Dedebant et son assistant Roulleau afin de tirer une méthode pour obtenir la courbe de fréquence d'une fonction aléatoire quelconque.

Un calcul aléatoire fondé sur la dérivée aléatoire de Slutsky

La théorie de Wehrlé et Dedebant repose, outre sur la notion d'échelle et de courbe de fréquence $F(\xi/P)$, sur celle de dérivée aléatoire, ce qui permet d'effectuer un calcul stochastique en moyenne quadratique. Plus précisément, ils montrent

49. La formule peut être mise sous la forme :

$$\overline{u} = \int_{+\infty}^{-\infty} u f(u) du$$

dans le cas où la courbe de fréquence $\frac{n_i}{N}$ est remplacée par la fonction de densité de probabilité $f(u_{i+1} - u_i f_i)$. Cette formule, qui exprime la moyenne en fonction d'une densité de probabilité, sera à la base des recherches plus théoriques surtout à partir des années 1940 grâce aux travaux du mathématicien Jean Bass.

50. Pour la genèse expérimentale du concept de fonction aléatoire d'après Wehrlé et Dedebant voir [Dedebant et Wehrlé 1944b, 99].

que la dérivée aléatoire au point P (déterminée pour une question de simplicité par son abscisse x) d'une fonction aléatoire $X(x)$ existe si le rapport :

$$\frac{X(x+h)-X(x)}{h}$$

admet une limite aléatoire quand $h \to 0$, limite qui est encore elle-même une fonction aléatoire. Cette limite sera la dérivée aléatoire qui sera dénotée par $\dot{X}(x)$. En outre, cette dérivée est en moyenne quadratique si :

$$\lim_{h\to 0}\left[\overline{\frac{X(x+h)-X(x)}{h}-\dot{X}(x)}\right]^2 = 0$$

Ce concept est important parce qu'il permet de faire des analogies avec la mécanique classique : si $X(x)$, supposée dérivable en moyenne quadratique, décrit le déplacement d'une particule du fluide, alors la vitesse de cette particule n'est que sa dérivée aléatoire, c'est à dire $U(t) = \dot{X}(x)$. Grâce à cette définition, ils pouvaient introduire les propriétés concernant la dispersion $\sigma(x)$ (ou moment d'ordre 1) de la variable aléatoire $X(t)$, la dispersion $\dot{\sigma}$ (ou moment d'ordre 2) de la dérivée aléatoire $\dot{X}$ ainsi que le coefficient de corrélation entre $X(x)$ et $X(x+h)$:

$$\sigma^2 = \overline{X(x)^2},\ \dot{\sigma}^2 = \overline{\dot{X}(x)^2},\ r(x,x+h) = \frac{\overline{X(x)X(x+h)}}{\sigma(x)\sigma(x+h)}$$

D'après Wehrlé et Dedebant, la dérivée aléatoire devrait jouer en calcul des probabilités le même rôle que la dérivée ordinaire en analyse. C'est pourquoi ils étendirent plusieurs règles d'analyse classique au cas de la dérivée aléatoire, en particulier le concept de différentielle aléatoire, la règle de dérivation des fonctions de fonctions, la dérivée seconde aléatoire $\ddot{X}(x)$, la dérivée d'ordre k quelconque $\frac{d}{dx}X(x)^k$ etc. De plus, ils généralisèrent ce concept au cas du point $P(x,y,z)$ et du vecteur statistique (u,v,z) : la dérivée aléatoire sera alors un tenseur dont les composantes sont les neufs dérivées aléatoires u_i, v_j, z_k pour $i,j,k = x,y,z$.

La définition de dérivée aléatoire adoptée par Wehrlé et Dedebant est celle définie par Slutsky. Dans son travail traduit et publié dans les Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, "Sur les fonctions éventuelles continues, intégrables et dérivables dans le sens stochastique" (1928), le mathématicien russe avait donné des définitions concernant la continuité aléatoire, l'intégrale stochastique, et la dérivée stochastique [51]. Slutsky avait édifié toute une théorie mathématique

51. Nous reviendrons sur la dérivée aléatoire et sur son apport mathématique à la mécanique des fluides dans le chapitre 4. Pour l'instant, il est suffisant de savoir que ce concept permet d'édifier

indépendamment de la théorie de la turbulence ou d'autres théories physiques et, entretemps, Wehrlé et Dedebant avaient développé, au moins au début, cette théorie du calcul aléatoire indépendamment des mathématiciens, selon ce que Wehrlé écrit dans son ouvrage *l'univers aléatoire* :

> "Sans le savoir, nous avions été précédés dans cette voie [l'analyse aléatoire] par un mathématicien russe, Slutsky, qui avait défini la dérivée aléatoire en moyenne quadratique. C'est quand nous vînmes exposer à M. Fréchet les premiers succès en Physique de notre Analyse aléatoire, qu'il nous révéla le mémoire de Slutsky (paru dans un bulletin de statistique assez confidentiel) dont il se rappelait l'existence. Quoi qu'il en soit, la publication de Slutsky ayant précédé de quelques mois notre visite à M. Fréchet, sa priorité ne fait pas de doute ; mais il ne semble pas avoir perçu toute la portée de son idée ni lui avoir donné le développement qu'elle méritait. (Voir E. Slutsky, Qualche propagazione relative alle teorie delle funzioni aleatorie, dans *Giornale dell'Istituto italiano degli Attuari, 8^e année, N. 2, avril 1937.*)" [Wehrlé 1956, 19]

Ainsi, cette extension des règles de l'analyse ordinaire au cas des fonctions aléatoires avait conduit l'école française vers l'édification d'une *analyse aléatoire* capable de donner une interprétation différente des concepts de la théorie statistique de la turbulence de Taylor-Von Kármán comme le spectre et le tenseur de corrélation [Dedebant et Wehrlé 1939]. En effet, la relation qui lie la transformée de Fourier de la fonction de corrélation entre $X(x)$ et $X(x+s)$ au spectre de la fonction aléatoire $X(x)$ sera justifiée par un théorème de Slutsky selon lequel la valeur probable du carré de la fréquence ω du spectre dans la représentation de $U(x)$ par une série de Fourier, est égale au terme correspondant de la série de Fourier qu'il représente. En ce qui concerne la corrélation, à côté de la corrélation géométrique (c'est à dire le tenseur de corrélation de Von Kármán), il introduit celui de corrélation physique d'un fluide turbulent, dont le tenseur correspondant sera défini à partir de la dérivée aléatoire de la vitesse. Cette définition diffère de la définition géométrique car elle concerne les corrélations entre deux points en deux instants différents "en suivant un élément matériel ", ce qui intervient dans les problèmes dynamiques et physiques (les problèmes gouvernés par les phénomènes de diffusion par exemple).

A partir des années 1940-1945, Wehrlé et Dedebant développeront leur analyse aléatoire pour construire une *mécanique aléatoire*, capable de généraliser la mécanique classique : si cette dernière repose sur le concept de point matériel

une théorie qui est en accord avec les expériences de Wehrlé et Dedebant.

doué d'une masse et concentré en un point géométrique, la mécanique aléatoire s'appuie sur le concept de *corpuscule aléatoire* et de *connexion aléatoire* qui prennent en compte, sur une voie statistique, outre les propriétés mécaniques, celles thermodynamiques grâce à son énergie d'agitation [52]. Ainsi, le point matériel est remplacé par le corpuscule aléatoire dont les propriétés thermodynamiques permettent de décrire les phénomènes de diffusion et de dissipation. Le corpuscule aléatoire $V(t)$ est défini comme l'ensemble des fonctions aléatoires du temps (X, Y, Z) qui sont dérivables au moins deux fois en moyenne quadratique. Si la fonction aléatoire $X(t)$ admet une dérivée aléatoire $U(t)$ en moyenne quadratique, le corpuscule aléatoire défini par les vecteurs position $X(t)$ et vitesse $U(x)$ $(V(X_1(t), X_2(t), X_3(t), U_1(t), U_2(t), U_3(t)))$, au lieu de remplir l'espace avec une masse ponctuelle, le remplit avec une certaine densité de probabilité de présence $\rho(x, y, z, t)$. Il est possible de généraliser ainsi plusieurs concepts de mécanique et de thermodynamique qui ont une interprétation purement statistique. Dans ce cadre, la fonction de corrélation de Taylor est généralisée par le concept de connexion entre deux fonctions aléatoires $V(t_1)$ et $V(t_2)$ en deux instants successifs [Bass et. al. 1945b] et [Bass et. al. 1945a]. Ensuite, en collaboration avec J. Moyal, Wehrlé et Dedebant trouvent une autre méthode plus abstraite pour déduire les équations de l'hydrodynamique classique et celle adjointe de la thermodynamique, en supposant que le fluide turbulent, composé par N microparticules, est un corpuscule aléatoires $V(t)$, [José et. al. 1940].

En définitive, leurs idées sur la mécanique aléatoire deviendront de plus en plus abstraites et éloignés des développements successifs de la théorie de Taylor-Von Kármán au sein de la communauté internationale de mécanique des fluides autour des ICAM. De plus, ils divergeront progressivement de leur but initial de fonder une théorie qui puisse être en accord avec l'expérience.

3.3.3 Le rôle des équations de Navier-Stokes dans la théorie de Wehrlé et Dedebant

Les *équations aux valeurs probables*

D'après Wehrlé et Dedebant, si le fluide n'est turbulent qu'à l'échelle moléculaire la fonction de distribution de la vitesse est telle que ses valeurs moyennes

52. Sur les règles de son analyse aléatoire voir [Dedebant et Wehrlé 1944b], premier fascicule. Ce mémoire, publié dans une revue portugaise, *Revue Portugaliae Physica*, est un résumé assez détaillé et technique de l'ensemble des recherches sur l'analyse et la mécanique aléatoire et son application à la turbulence auxquelles Wehrlé et Dedebant avaient travaillé depuis 1936. Le deuxième fascicule, publié dans la même revue, montre les applications de leur théorie à la physique, y compris la théorie de la turbulence [Dedebant et Wehrlé 1944b].

$\overline{u_k}$ $(k = 1, 2, 3)$ satisfont les équations de Navier-Stokes. Cependant, "il n'y aucune raison pour que, dans le cas général d'un fluide turbulent, les $\overline{u_k}$ vérifient les équations de Navier" [Bass 1946, 191]. C'est le cas par exemple de l'atmosphère. En effet, l'atmosphère suppose, au contraire du courant d'air créé en soufflerie, l'existence de plusieurs étages intermédiaires de perturbation entre l'échelle moléculaire et celle des particules. Sur ces hypothèses et sur la conviction que la vitesse turbulente des particules du fluide n'est pas en général continue et dérivable, ils tirent des conclusions assez contestables selon lesquelles il n'est pas possible d'appliquer les équations de Navier-Stokes dans le cas général d'un écoulement turbulent. C'est pourquoi ils contestent la méthode de Reynolds pour les déduire, parce qu'elle suppose les vitesses continues et dérivables. Face à ce problème, ils montrent que les équations de Navier-Stokes pour un écoulement turbulent incompressible 3.1 peuvent être obtenues par une autre voie comme cas particulier des *équations aux valeurs probables*. Les valeurs probables sont les moments statistiques des fonctions aléatoires décrivant les propriétés du fluides et ce sont eux seulement (ou des fonctions macroscopiques analogues) qui doivent figurer dans les équations de la mécanique des fluides. Ainsi, en supposant que l'état et le mouvement du fluide soient définis par cinq variables aléatoires (densité ρ, vitesse u, v, w, θ température, ces équations par rapport à la composante u de la vitesse sont de la forme suivante [Dedebant et Wehrlé 1938] :

$$\frac{d_0}{dt}(\overline{\rho a}) + \overline{\rho a} \sum \frac{\partial u_0}{\partial t} + \sum \frac{\partial}{\partial x} \overline{a \rho u''} = \overline{D(a)}$$

où a est une variable aléatoire quelconque fonction des variables fondamentales. Ces équations sont obtenues sous les hypothèses que le fluide est limité par une surface géométrique, que la densité du mouvement d'ensemble est la valeur probable de la densité ($\rho_0 = \overline{\rho}$) et que la quantité de mouvement est la valeur probable de la quantité de mouvement ($\rho_0 u_0 = \overline{\rho u}$). Il est à noter la particulière notation $\frac{d_0}{dt}$ qui n'est pas défini dans [Dedebant et Wehrlé 1938] : s'agit-il de la valeur probable de la quantité $\frac{d}{dt}(\overline{\rho a})$?. C'est à partir de cette équation qu'ils déduisent les équations de l'hydrodynamique. En égalisant la grandeur ρa à la masse, ils obtiennent l' équation de continuité alors que si ρa est la vitesse du mouvement d'ensemble, ils déduisent les équations du mouvement du fluide dans leur forme classique. Enfin, pour ρa égale à l'énergie cinétique, ils tirent l'équation de l'énergie pour chaque étage de perturbation, une équation qui revêt une forme analogue au second principe de la thermodynamique sous la forme de Clausius mais, au lieu de décrire la quantité de chaleur dégagée, elle exprime la quantité d'énergie qui entre ou sort d'une surface fermée.

3.3.4 L'IMFL et la légitimation expérimentale des idées de Wehrlé et Dedebant

Au sein de cette école française de Wehrlé et Dedebant, Kampé de Fériet assuma un rôle marginal en ce qui concerne le développement mathématique de leurs idées. Cependant ses travaux expérimentaux effectués avec l'équipe à l'IMFL jouent un rôle fondamental dans la légitimation des idées des deux polytechniciens et donc dans le contexte du rapprochement de la théorie à la pratique dans le domaine de la mécanique des fluides. De plus, c'est ce mathématicien qui se charge de faire connaître les idées de cette école à l'étranger et d'enrichir les échanges avec les spécialistes d'autres nations, notamment les États-Unis. Dans ce cadre, nous montrerons deux cas où se manifeste son rôle en tant qu'expérimentateur de l'équipe IMFL dans la légitimation des idées théoriques de Wehrlé et Dedebant. Le premier cas se trouve dans sa communication *Some Recent Researches on Turbulence* lors de l'ICAM de Cambridge 1938 (USA) et le deuxième dans un travail expérimental effectué à l'IMFL en collaboration avec Martinot-Lagarde et Rollin, *Étude sur l'utilisation des anémomètres dans un courant d'air*(1939).

***Some Recent Researches on Turbulence*, ICAM 1938 :**

En 1938, Kampé de Fériet fut envoyé pour la première fois aux États-Unis par le ministère de l'Éducation Nationale et l'ONM afin de présenter ses recherches à la communauté scientifique américaine. Dans ce contexte, il visita les laboratoires d'aéronautique du National Bureau of Standards de l'Université Stanford, le Weather Bureau of the United States (appelé aujourd'hui National Weather Service), les laboratoires d'aérologie de l'Université du Michigan, les laboratoires du NACA, le département d'aéronautique du Massachusetts Institute of Technology et d'autres institutions et usines appartenant au monde de l'aéronautique américaine. Sur l'invitation de von Kármán, il participa aux conférences sur la turbulence au Californian Insitute of Technology (Pasadena), à l'Institute of Aeronautical Sciences (Los Angeles), et à Cambridge lors de l'ICAM organisé par l'Université de Harvard et le Massachusetts Institute of Technology à Cambridge pendant les journées du 12 au 16 septembre 1938. A cette occasion, Von Kármán avait organisé un symposium sur la turbulence et avait demandé à Taylor, Prandtl et Kampé de Fériet de faire un exposé synthétique sur l'état des travaux sur ce sujet dans leur pays respectifs [53].

Ainsi, sous l'invitation de Von Kármán, Kampé de Fériet présente les résultats qu'il avait obtenu dans le cadre des son activité de recherche en collaboration

53. Projet de voyage en Amérique de M. Kampé de Fériet, 1938, [Archives de l'ONERA Lille, Fonds Kampé de Fériet].

avec Wehrlé et Dedebant. Sa communication, *Some Recent Researches on Turbulence* [Kampé de Fériet 1939b], est divisée en deux parties, l'une théorique et l'autre expérimentale. Dans la première partie, il donne un aperçu des résultats théoriques de Wehrlé et Dedebant, appuyant sur la définition de dérivée aléatoire de Slutsky et de courbe de fréquence. Là, il explique que les résultats qu'ils obtiennent sont les mêmes -avec un arrière-plan différent- que ceux que Taylor avait achevés en 1921 et en 1935. Dans la deuxième partie, il montre que ces résultats sont en conformité avec les mesures expérimentales effectuées dans les souffleries horizontale et verticale de l'IMFL. Ces résultats sont obtenus grâce l'étude de la structure de la turbulence de Wehrlé et Dedebant par la cinématographie de bulles de savon. Cette deuxième partie mérite d'être détaillée, car elle montre un exemple de la manière dont l'IMFL s'engage pour vérifier des théories mathématiques, théories qui comme nous l'avons vu dans les sous-sections précédentes sont loin d'être empiriques.

Afin de vérifier ces résultats, un son collaborateur de Kampé de Fériet, l'ingénieur Pierre Dupuis, avaient mis en place un système pour étudier la structure de la turbulence par la cinématographie de bulles de savon. Il s'agit d'une méthode de visualisation des trajectoires alternative à l'émission de filets des fumées de tabac [54]. Toutes les mesures étaient effectuées dans la soufflerie horizontale et verticale de l'IMFL. Dans le détail, les bulles de savon étaient produites à un point E du courant d'air produit par la soufflerie et se dirigeaient vers un plan B, posé à une distance x du point E et perpendiculaire à l'axe de la soufflerie. Derrière ce plan, une camera C enregistrait la position de la bulle de savon à l'instant où elle traversait le plan [Figure 3.2]. Le film obtenu est alors projeté sur une table de classification avec 2500 compartiments : à chaque instant où la camera enregistrait la position de la bulle, son image était projetée sur l'un de ces compartiments, et une petite bulle la représentant était alors insérée dans ce compartiment. Ainsi, chaque compartiment contenait un certain nombre de bulles et la somme de ces nombres allait à constituer une expérience statistique (*statistical cloud*) portant normalement sur un total de 10000 bulles. Sur ce cloud, l'équipe IMFL mesurait la dispersion σ en trouvant que σ^2 varie linéairement avec la distance x, ce qui est en accord avec les mesures sur l'émission des filets de fumée effectuées par Lewis F. Richardson pour vérifier les résultats théoriques de Taylor concernant la loi de diffusion d'une particule en mouvement turbulent [Taylor 1922]. De plus,

54. Le rapport technique détaillé, *Étude de la structure de la turbulence par cinématographie de bulles de savon* (1937) se trouve dans les Archives de l'ONERA Lille.

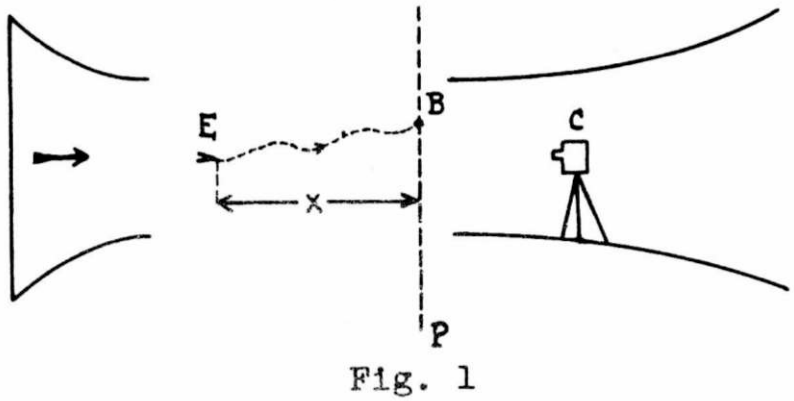


FIGURE 3.2 – Méthode de cinématographie de bulles de savon.

Martinot-Lagarde avait montré la validité de la formule empirique :

$$\sigma^2 = 2\frac{\overline{V'^2}}{U_0}L(x - \alpha L)$$

où U_0 est la vitesse moyenne du courant d'air, $\overline{V'^2}$ la dispersion de la fluctuation de la vitesse, L la longueur caractéristique correspondant à l'échelle de la turbulence considérée, et α un coefficient qui prend en compte la fonction de corrélation de la vitesse V' entre deux points voisins x et $x+h$ ([Figure 3.3]). A leur tour, Wehrlé et Dedebant avait démontré que la formule de Martinot-Lagarde pouvait être dérivée de leur théorie en posant :

$$\overline{X(x)\dot{X}(x)} = \frac{1}{2}\frac{d}{dx}\overline{X(x)^2}$$

Un deuxième résultat expérimental prouvant la validité de la théorie de Wehrlé et Dedebant concerne les courbes de fréquence. C'est là que Kampé de Fériet prend part activement à l'ensemble des travaux en équipe visant à légitimer les idées théoriques de Wehrlé et Dedebant. Dans ce contexte, il avait collaboré avec Dedebant et un de leurs collaborateurs, Roulleau, pour tirer une méthode pour obtenir la courbe de fréquence $F(\xi/P)$ d'une fonction aléatoire quelconque $X(x)$ dont la dérivée aléatoire correspond à la vitesse du fluide turbulent. En outre, cette méthode

pouvait être appliquée à un instrument de mesure quelconque (anémomètres, thermomètres, instruments optiques etc..). Plus précisément, cette méthode consistait à enregistrer le déplacement des "taches" de lumière (représentant le mouvement turbulent), à travers leur impression sur une plaque photographique durant un convenable intervalle de temps dépendant de l'échelle de la turbulence considérée. Conséquemment, la plaque photographique obtenue présentait des noircissements d'une intensité variable, lesquels permettent de dresser la courbe des fréquences des quantités mesurées [Figure 3.4]. Kampé de Fériet présenta ce type de recherche dans un contexte international où la théorie statistique de la turbulence étant l'une des thématiques les plus traitées à l'époque. Plusieurs spécialistes de la mécanique des fluides, appartenant à différents milieux scientifiques, furent présents à l'ICAM de Cambridge, parmi lesquels nous pouvons mentionner le mathématicien Norbert Wiener, *The use of Statistical Theory in the study of turbulence*, le physicien Taylor, *Some recent developments in the study of turbulence*, le pionnier de l'aérodynamique Prandtl *Beitrag Zum Turbulenz*, l'ingénieur civil Eric Reissner *Note on the statistical theory of turbulence*, Anton Adam Kalinske *Application of statistical theory of turbulence to hydraulics problems*.

La légitimation du concept d'échelle de Wehrlé et Dedebant.

Un autre travail expérimental de l'IMFL destiné à vérifier des résultats théoriques de Wehrlé et Dedebant fut publié par Kampé de Fériet, Martinot-Lagarde et Rollin dans la revue *Les Publications Scientifiques du Ministère de l'Air* en 1939. Cette étude permettait de légitimer le concept d'échelle introduit par l'école française dans le but d'étendre celui de Taylor au cas de l'atmosphère. En admettant que la notion d'échelle a une valeur expérimentale importante au sein des techniques de l'emploi des anémomètres, ils déclarent :

> La notion d'échelle comporte des conséquences pratiques importantes pour les méthodes expérimentales de la Mécanique des l'Atmosphère : un appareil de mesure quelconque ne reproduit correctement les variations de la grandeur mesurée que si leur durée dépasse un certain seuil ; de ce fait même, la description qu'il fournit du phénomène étudié correspond à une certaine échelle dans le temps ; il en résulte aussi une certaine échelle dans l'espace, car la durée du passage des particules au point où se trouve l'instrument de mesure dépend de la dimension des particules" [Kampé de Fériet et. al. 1939, 2]

L'équipe de l'IMFL se proposa d'étudier l'utilisation des anémomètres dans un courant d'air turbulent afin de déterminer l'échelle de la turbulence à laquelle un certain type d'anémomètre est adapté. L'ensemble des résultats obtenus concerne différents types d'anémomètres : les anémomètres à fil-chaud, à coupelle type

Papillon, à coupelle type Rouy, et l'anémoclinomètre IMFL, qui est un appareil conçu et testé par l'institut. Dans la section suivante nous verrons que son équipe ne se limite pas à la vérification des théories de Wehrlé et Dedebant mais il se focalise également sur le perfectionnement des outils pour mesurer la turbulence et l'étude expérimentale de la turbulence atmosphérique.

Table 1

	M mm. (Mesh)	d mm. (Diameter of wire)	depth mm.	L cm.	$\sqrt{\frac{\overline{V'^2}}{U_o}}$
(A) Horizontal wind tunnel					
free				48	0.030
grid No. 5	25	2		21	0.038
" " 2	50	5		21	0.041
filter " 2	150		100	33	0.030
" " 4	150		200	34	0.021
(B) Vertical wind tunnel				32	0.041

FIGURE 3.3 – Tableau des résultats obtenus dans les souffleries horizontale et verticale concernant la mesure de la longueur caractéristique L et le rapport entre les deux vitesses $\overline{V'^2}$ et U_0, en supposant que la turbulence soit isotrope ou non isotrope [Kampé de Fériet 1939b].

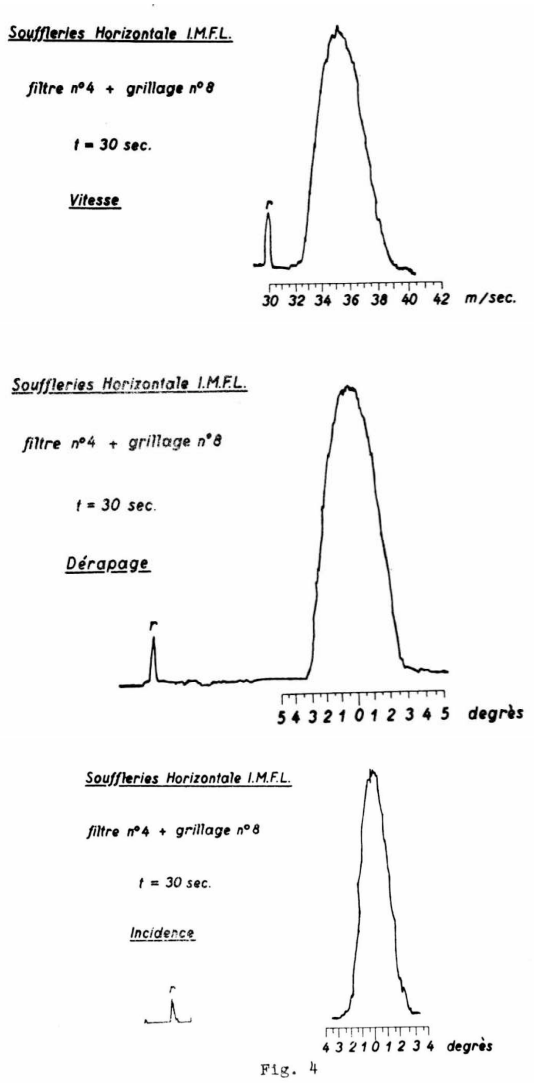


FIGURE 3.4 – Courbes de fréquences de la vitesse, du dérapage et de l'incidence obtenues par l'IMFL.

3.4 Renforcer la théorie à travers l'amélioration de l'outillage scientifique : l'IMFL

Dans la section précédente nous avons vu que le point de vue purement statistique de Wehrlé et Dedebant permet de créer une théorie qui a à la base non seulement une importante investigation mathématique (elle repose sur la dérivée aléatoire de Slutsky) mais qui est aussi conforme à l'expérience car elle respecte la nature aléatoire de la turbulence et se fonde sur le concept de courbe de fréquence. De plus, elle est légitimée par les tests expérimentaux de l'équipe de l'IMFL guidée par Kampé de Fériet. En d'autres termes, nous avons montré un exemple de *changement d'approche au problème de mécanique des fluides* permettant un rapprochement des questions théoriques aux questions empiriques. Si la section précédente se concentrait sur les efforts des théoriciens dans le but de créer des théories toujours plus applicables dans les laboratoires, dans cette section nous nous focaliserons sur les efforts des expérimentateurs. Pour cette raison, elle portera sur le deuxième facteur marquant ce rapprochement : le *perfectionnement de l'outillage scientifique* (essais en soufflerie et amélioration des anémomètres).

Afin de faire ressortir ces éléments, nous analyserons le cas du laboratoire d'aérodynamique de l'IMFL et nous présenterons cette analyse en deux parties. Dans la première partie, nous montrerons les études expérimentales de l'équipe de Paul Guienne, le chef de la soufflerie horizontale, visant à améliorer les essais en soufflerie. Il étudie ce qui s'appelle le problème de la qualification en soufflerie, c'est à dire les effets de la turbulence produite en soufflerie sur certains profils d'aile. Ce problème à échelle internationale fut abordé par plusieurs expérimentateurs comme Simmons dans le NPL, Dryden et Kuethe dans le NACA et même Eiffel dans son laboratoire d'Auteuil. Dans la deuxième partie nous présenterons les études concernant les perfectionnements des techniques de l'emploi des anémomètres et la création d'un nouvel anémomètre par les collaborateurs de l'IMFL : l'anémoclimomètre IMFL. Ce dispositif fut produit à l'échelle industrielle et connut un large succès à l'étranger, surtout aux États-Unis, à la Johns Hopkins University (Maryland).

Ces recherches permettront à l'institut de se placer au même rang que les instituts de von Kármán, Taylor, Dryden, Burgers et Prandtl.

3.4.1 Les techniques concernant les essais en soufflerie

Un problème à l'échelle internationale

Les investigations théoriques de la turbulence que nous avons présentées dans la première section trouvèrent un terrain fertile dans le cadre de nouveaux problèmes posés par les essais en soufflerie pendant les années 1930. Ces essais avaient pour but d'améliorer la géométrie des profils des ailes de l'époque. Dans ce cadre, les ingénieurs de différents laboratoires d'aérodynamique s'aperçurent que la même maquette enregistrait de mesures différentes dans les diverses souffleries. En 1923, le NPL envoyait la même maquette à un grand de nombre de souffleries du monde afin de comparer les résultats, desquels émerge que ceux des souffleries américaines variaient de 50 % de la valeur moyenne [Battimelli 1986, 34]. Cette divergence était due, pour la plupart, à la turbulence de la soufflerie qui influençait les mesures de la maquette : il y avait des souffleries plus turbulentes que d'autres. En réfléchissant sur la cause de ce problème, ils découvrirent que la principale responsable de cette divergence était l'"intensité" de la turbulence, qui provoquait une transition prématurée de la couche limite du profil d'aile de laminaire à turbulente, ce qui déterminait une variation non négligeable du coefficient de traînée C_x. Au NBS, les ingénieurs H. Dryden et A.Kuethe avaient démontré que la variation de C_x pouvait atteindre une valeur de 100 % dans le cas d'une maquette de dirigeable [Dryden et Kuethe 1931].

La découverte de l'influence de la turbulence sur les mesures en souffleries date du début du xx^{e} siècle. Le problème se pose lorsque Eiffel, suite à des essais dans sa soufflerie publiait en 1911 une valeur de la trainée d'une sphère $C_x = 0,18$ laquelle s'écartait énormément de celle obtenue à Göttingen quelques mois plus tard, dans une soufflerie dont le courant d'air soufflait à la même vitesse. C'est Prandtl qui donna une solution à ce problème, en obtenant la même valeur qu'Eiffel en perturbant le courant d'air par des grilles placées à côté de la sphère. Dix ans après les travaux de Prandtl, les ingénieurs commençaient à utiliser les techniques des anémomètres à fil-chaud pour mesurer les fluctuations de la vitesse du courant d'air. C'est le cas de Dryden aux États-Unis, Simmons en Angleterre et Burgers en Hollande. En 1931, grâce à l'emploi de ce type d'anémomètre, Dryden réalisa une autre méthode pour obtenir des mesures directes de l'influence de la turbulence des souffleries en obtenant une corrélation entre l'intensité même $T_1 = \frac{\sqrt{\overline{u^2}}}{U}$ et le nombre critique de Reynolds $\mathfrak{Re}_c$ pour une sphère dans le cas d'une turbulence isotrope [Dryden et Kuethe 1931]. Malgré son acceptation chez les expérimentateurs, cette méthode sera soumise à une révision pendant les années qui suivront afin d'être harmonisée avec les nouveaux résultats théoriques de Taylor sur le concept d'échelle [Taylor 1935]. Plus précisément, d'après la théorie de

Taylor, l'écoulement d'une turbulence isotrope et homogène était caractérisé non plus par une seule constante T_1 mais par deux, la deuxième T_2 étant la longueur caractéristique L introduite par Taylor pour définir la dimension des tourbillons (mesure de l'échelle spatiale). Par suite, la seule connaissance de $\mathfrak{Re}_c$ ne suffisait plus pour déterminer T_1 et T_2 et donc l'intensité de la turbulence.

Ainsi, l'investigation de la turbulence des souffleries conduit le NBS à une co-opération avec la NACA afin d'inclure cette nouvelle variable, à savoir l'échelle de la turbulence, dans l'étude de l'intensité de la turbulence et de ses effets sur le nombre critique de Reynolds d'une sphère. L'article de Dryden et ses collaborateurs [Dryden 1937] est très important dans ce contexte parce qu'il fait une investigation expérimentale des effets des nouveaux concepts d'échelle et de fonction de corrélation sur la mesure de l'intensité de la turbulence et du nombre critique de Reynolds d'une sphère. Dans cet article, ils trouvèrent que la relation suggérée par Taylor entre le nombre critique de Reynolds d'une sphère et la quantité $\frac{D}{L}\frac{\sqrt{\overline{u^2}}}{U}$ (D est le diamètre de la sphère) est vérifiée du point de vue expérimental, en observant les effets de la dimension de la sphère. A l'aide des anémomètres à fil chaud, ils vérifièrent tout d'abord les résultats de Taylor en faisant des mesures de L à partir de la corrélation entre les fluctuations de la vitesse en deux points différents. Ensuite, ils mesurèrent l'intensité de la turbulence et le taux de décadence. Puis, ils déterminèrent le nombre critique de Reynolds pour une sphère sous la condition que les deux variables -échelle et intensité - soient connues. Enfin, ils calculèrent les variations de la fonction de corrélation en fonction de la fréquence. Le problème de la qualification de la turbulence en soufflerie avait suscité l'intérêt de plusieurs ingénieurs y compris Paul Guienne à l'IMFL.

Les techniques de Guienne dans la soufflerie horizontale

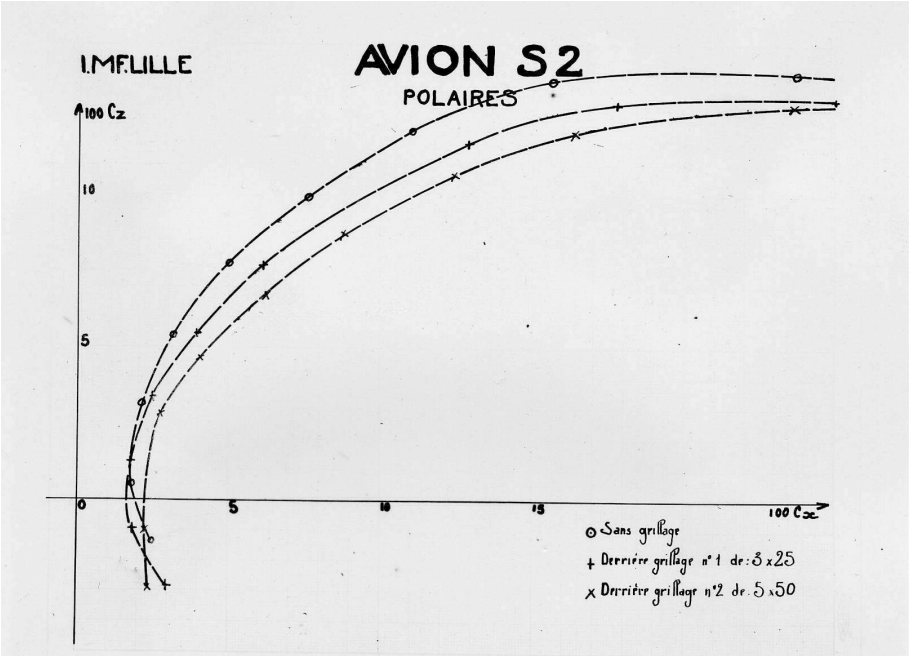


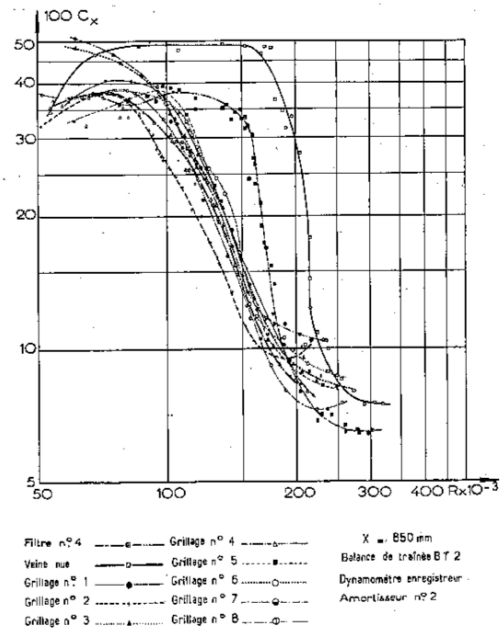
FIGURE 3.5 – Effet sur la polaire d'une maquette d'avion de la modification de la turbulence de la soufflerie [Guienne 1940]

.

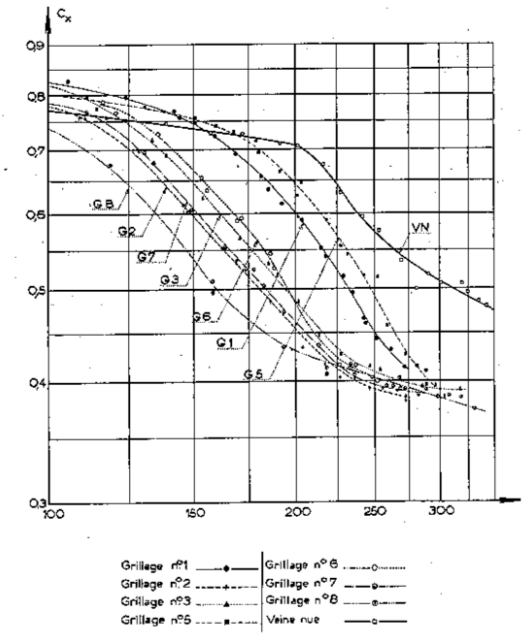
Les recherches de l'équipe de Guienne concernant ces sujets se trouvent dans un rapport technique publié en 1940 pour le Groupement de Recherche Aéronautique (GRA). Ce document contient une étude que Guienne avait entreprise à la demande des Services Techniques du ministère de l'Air [Guienne 1940] [Figure 3.5]. Il s'agit d'une étude expérimentale que son équipe avait effectuée dans la soufflerie horizontale dans le but d'étudier les effets de la turbulence sur certains profils d'aile. Sa technique consistait en la modification de la turbulence produite en soufflerie à travers un système de grilles placées à la sortie du collecteur. Cela permettait de faire un classement de cette turbulence. Là, au contraire de ses prédécesseurs, il avait utilisé le cylindre au lieu de la sphère, en prouvant que ce choix est plus avantageux car, en plus d'avoir la même courbe de trainée que la sphère, l'écoulement autour du cylindre se rapproche davantage de l'écoulement d'un profil d'aile. De plus, les essais sur la sphère nécessitaient une suspension portant la sphère même (le carénage de bras pas exemple), ce qui influençait la valeur de son nombre critique de Reynolds de 200000 à 170000 selon les expérimentations de Guienne. En revanche, le cylindre pouvait être essayé à l'"état pur", tenu pour des extrémités, sans aucune suspension ou autres causes perturbatrices,

et les mesures étaient beaucoup plus simples à effectuer. Dans ce rapport Guienne présente ces avantages, en comparant les résultats obtenus avec la méthode du cylindre avec ceux qu'il avait déduits auparavant avec la sphère [Figure 3.6].

Guienne exposera ses résultats cinq années plus tard lors du Congrès National de l'Aviation Française qui eut lieu à la Sorbonne le 3 avril 1945, congrès marqué par une forte volonté de créer des ponts entre la science pure, les applications techniques et les réalisations pratiques, et qui amènera la naissance de l'ONERA et une ascension de l'aéronautique et de l'aviation immédiatement après la guerre. Outre aux techniques visant à améliorer l'efficience des souffleries pendant les essais des maquettes soumises à un courant turbulent, l'IMFL a conduit toute une série de travaux afin de mettre au point des instruments toujours plus précis pour mesurer la vitesse d'écoulement en un point de ce courant, à savoir les anémomètres.



(a)



(b)

FIGURE 3.6 – Réseau de courbes Cx en fonction du nombre de Reynolds, avec différents grillages pour une sphère de diamètre de 80 mm (a) et un cylindre de diamètre 88 mm (b). La comparaison des résultats montre que la courbe relative au cylindre présente un caractère de régularité plus marqué par rapport à la courbe obtenue au moyen de la sphère [Guienne 1940].

3.4.2 Le perfectionnement des anémomètres à l'IMFL et l'anémoclinomètre IMFL

Au delà de la méthode de Dryden pour calculer l'intensité de la turbulence, Guienne, déjà à partir de 1925-1926, perfectionnera aussi les techniques d'emploi des anémomètres dans la soufflerie horizontale. Dans ce contexte, il avait consacré une partie de ses études à l'anémomètre à fil-chaud mis à disposition de l'IMFL par l'ONM. Afin d'étudier la fidélité et le temps de réponse de l'appareil à une échelle temporelle définie, Guienne avait enregistré les oscillations de la vitesse au moyen d'une caméra ordinaire à film de 35 mm et à une vitesse de soufflerie de 15 m/s, en plaçant l'instrument derrière l'hélice coupe-vent. Ses résultats sont mentionnés dans [Kampé de Fériet et. al. 1939, 2].

La mise au point d'un outillage expérimental adapté à la théorie de Wehrlé et Dedebant fut l'un des points du programme établi par la Commission de la Turbulence Atmosphérique. Les premiers anémomètres était tarés selon une méthode appelée statique, en les plaçant dans un courant d'air à vitesse uniforme, ce qui ne prenait pas en compte "une recherche sérieuse sur la turbulence ; quel crédit accorder à une courbe anémomètrique, lorqu'on ne connaît pas dans quelle limites elle déforme la réalité ?" [Kampé de Fériet 1937a, 34]. Afin d'étudier le problème, l'une des premières décisions de la commission fut la création à la soufflerie horizontale de l'IMFL d'un équipement complet pour l'étude du comportement d'un anémomètre dans un courant d'air à vitesse rapidement variable. Cet équipement était composé de deux appareils. Le premier dispositif, créé par Martinot-Lagarde, consistait en une hélice coupe vent permettant d'étudier l'effet d'une variation périodique de la vitesse du vent sur un anémomètre alors que le deuxième était un chariot permettant d'étudier l'effet d'une brusque rafale.

Les différents types d'anémomètre furent soumis à cet ensemble de tests, qui servirent en outre à la création d'un nouveau anémomètre, *l'anémoclinomètre*, conçu et réalisé par l'IMFL sur la demande du Service de Recherches Aéronautiques. Imaginé par Martinot-Lagarde, le fonctionnement de ce dispositif fut présenté pour la première fois à l'Académie des Sciences en 1934 [Martinot-Lagarde 1934]. Sans entrer trop dans les détails, l'appareil est une sphère percée de trous qui détermine la vitesse vectorielle du vent en grandeur et direction au moyen de la mesure de trois différents types de pression. Les résultats permettent de dresser respectivement les courbes de la vitesse, de l'azimut et du site [Figure 3.7] :

1. "La différence entre la pression totale P_T prise au col de Venturi dont l'axe perce horizontalement la sphère et une pression de référence P_s définie par un ensemble de trous répartis uniformément sur toute la surface de la sphère, donne la valeur de la vitesse V

2. La différence entre les pressions P_D et P_G de deux trous placés symétriquement par rapport à l'axe du col de Venturi dans un plan horizontale donne l'azimut A du vecteur vitesse
3. La différence entre les pressions P_H et P_B de deux trous placés de la même façon que les précédents, mais dans un plan vertical donne le site S du vecteur vitesse" [Kampé de Fériet 1937a, 35]

La nouveauté de ce dispositif réside dans la position de la prise de pression totale P_T, placée sur le col de Venturi de façon à pouvoir avoir une mesure de la vitesse indépendante de la variation de la direction, ce qui permet lors d'une étude aérologique d'orienter l'anémoclinomètre dans la direction moyenne du vent, et de la laisser fixe sans avoir besoin d'une girouette comme pour les anémomètres classiques. Ainsi, le vent pouvait tourner dans un secteur de 90 degrés sans que l'indication de l'appareil cesse d'être corrigée. Quelques années plus tard, Rollin, qui joue un rôle fondamental dans l'amélioration des appareils des mesures aérologiques, perfectionnera les caractéristiques de l'instrument notamment sa durée de réponse et sa sensibilité. Dans ce cadre, il mettra au point un manomètre triple à enregistrement optique qui donne sur une seule bande de papier sensible à grande vitesse les trois courbes V, A, S [Kampé de Fériet et. al. 1938] et [Kampé de Fériet et. al. 1941].

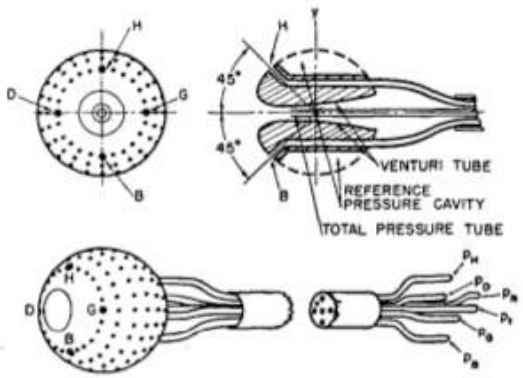
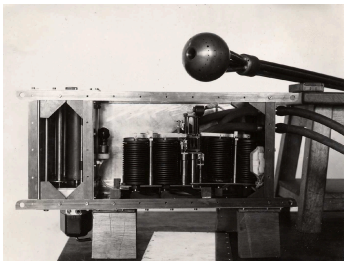


Figure 3.7 – Schéma de fonctionnement de l'anémoclinomètre IMFL [Martinot-Lagarde et. al. 1952].

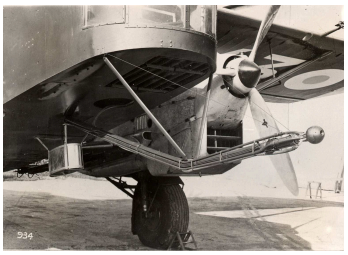
La création de l'anémoclinomètre IMFL fut conçue dans le cadre des campagnes aérologiques de Sauvegrain. Plus précisément, cet ingénieur avait utilisé le dispositif pensé par Martinot-Lagarde pour mettre au point une méthode visant à étudier la structure du vent naturel dans les couches basses de l'atmosphère [55]. Pendant les années suivantes, il sera utilisé dans les laboratoires de l'IMFL et

55. Cette méthode consistait en l'emploi de manches à air d'un mètre de longueur chacune, tendues à une extrémité sur une petite monture circulaire, attachée par trois fils à la corde d'un cerf-

lors des mesures sur le sol et en vol [Figure 3.8a et Figure 3.8b] de la turbulence atmosphérique conduites en collaboration avec la commission de la turbulence atmosphérique.



(a)] Anémoclinomètre I.M.F.L. avec son manomètre triple à enregistrement optique [Archives de l'ONERA Lille] .



(b) Anémoclinomètre IMFL monté en avant du fuselage de l'avion laboratoire (Potez 54) de la Commission de turbulence atmosphérique [Archives de l'ONERA Lille] .

FIGURE 3.8 – L'anémoclinomètre IMFL

Cet appareil fut l'objet de deux publications de Sir Gilbert Walker [56], *French anemometry* (1937) et *The anemoclimometer I.M.F.L* (1938) dans la revue *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. Ce physicien britannique avait visité l'IMFL en décembre 1936, en présentant une conférence sur les nuages et la stratosphère. L'anémoclinomètre rejoignit également les États-Unis suite à l'arrivée de Naftali Frenkiel au laboratoire de physique appliquée de la Johns Hopkins University (Maryland) pendant les années 1950 [57]. Dans une lettre daté de 17 octobre 1951 à Martinot-Lagarde, à cette époque-là devenu directeur de l'IMFL,

volant ; la corde porte une cinquantaine de manches à 2 m l'une de l'autre et on dispose plusieurs cerfs-volants à 10 ou 20 m l'un derrière l'autre dans le lit du vent. La position de l'ensemble des 100 ou 200 manches était enregistrée cinématographiquement. Grâce à cette méthode, Sauvegrain avait exploré certaines zones d'ascendances sur le terrain de la Banne d'Ordanche et la Chambre de Commerce de Boulogne sur Mer lui avait également confié (Juillet 1936) la prospection aérologique du futur aérodrome d'Alprech, en vue de déterminer les remous causés par les falaises. Il présenta sa méthode lors des Journées Scientifiques et Techniques de Mécanique des Fluides de Lille d'avril 1934 sous le titre *Sur une méthode d'étude de la structure du vent au voisinage du sol* .

56. Gilbert Thomas Walker (1868-1958) fut un physicien et statisticien connu pour la description révolutionnaire du phénomène climatique El Niño. Avant de devenir titulaire d'une chaire de météorologie à l'Imperial College de Londres en 1924, il travailla au sein du service météorologique de l'Inde dont il devint directeur honoraire.

57. Nous nous attarderons sur ce physicien, spécialiste international de la théorie statistique de la turbulence et élève de Kampé de Fériet, dans le chapitre 5.

Frenkiel le remercia pour lui avoir prêté l'instrument lors de l'une de ses visites à l'IMFL :

> "J'ai tardé à vous envoyer un mot après mon retour dans ce pays. Je voulais bien sûr vous dire que j'avais amené l'anémoclinomètre en bon état et que la raison de mon retard était due à quelques formalités à régler avec les autorités douanières américaines, et l'instrument devait rester à New York pendant un certain temps. Quoi qu'il en soit, tout est en ordre maintenant et je prévois de diriger l'intérêt de certains laboratoires à l'utilisation de cet équipement.
> Je tiens à exprimer ma grande reconnaissance pour votre prêt de cet instrument. Je suis sûr qu'il intéressera plusieurs chercheurs en Fluid Dynamics. Je vous remercie aussi de m'avoir si bien accueilli à l'Institut" [Archives de l'ONERA Lille]. [58]

De plus, dans une deuxième lettre envoyée quelques mois plus tard, Frenkiel montra son intérêt à recevoir une série d'anémoclinomètres afin d'effectuer des expérimentations au voisinage de la mer ou sur la mer même, ce qui permettait d'avoir des conditions plus proches à celles théoriques :

> "Certaines expériences pourraient être faites près de la mer ou même au-dessus de la mer, ce qui, bien entendu, est beaucoup plus régulier que le sol et, par conséquent, plus proche des conditions théoriques. Cependant, le problème qui se pose immédiatement est que le métal dont l'instrument est construit ne doit pas être corrodé par le sel ou l'eau qui pourrait le toucher. Si j'ai raison, l'anémoclinomètre de 80 mm est en acier ou même recouvert de nickel. Puis-je vous demander s'il serait possible de commander ces anémoclinomètres soit auprès de votre laboratoire, soit auprès d'un constructeur français avec lequel vous pourriez vous connecter ". [Frenkiel à Martinot-Lagarde, le 25 février 1952, Archives de l'ONERA Lille] [59]

58. " I delayed sending you a word after my coming back to this country. I wanted of course to tell you that I brought the anemoclimometer in good shape and this was the reason for my delay since I had some formalities to arrange with the American custom authorities, and the instrument had to stay in New York for some time. Anyway, everything is in order now and I plan to interest some laboratories in the use of this equipement.
I wish to express my great appreciation for your lending this instrument to me. I am sure that several research people in Fluid Dynamics will be interested in seeing it. May I also thank you for having receveid me so kindly at the Institute."

59. "[...]Some of experiments might be made near the sea or even above the sea which has, of course, a much more regular than the ground and, therefore, is closer to theoretical conditions. However, the problem immediately comes up that the metal of which the instrument is constructed should not be corroded by salt or water which might touch it. If I am right, the 80 mm anemoclinometer is made of steel or even covered with nickel. May I ask if it would be possible to order sush

Son intérêt devient plus explicite dans une troisième lettre :

> "Je suis en train d'essayer de convaincre certains constructeurs d'instruments dans ce pays de l'intérêt de développer un anémoclinomètre pour l'utilisation de la météorologie et de la dynamique des fluides. Pour le moment, la réaction est très favorable. Je voudrais vous demander si l'anémoclinomètre sous sa forme actuelle ou comme initialement construit a été breveté. Si aucun brevet n'a été pris, vous pourriez envisager d'en prendre un, s'il n'est pas trop tard pour le faire. Je me demande si vous avez des résultats de mesures avec l'anémoclinomètre. Je crois qu'il est peut-être désirable de publier quelque chose concernant la mesure du tenseur des contraintes. Si vous deviez avoir quelques enregistrements, je pourrais les utiliser ici sur des machines informatiques à haut débit et obtenir, je l'espère, des résultats assez intéressants.
> Avez-vous des informations concernant l'application de l'anémoclinomètre dans l'eau ? Je crois qu'une telle application sera particulièrement intéressante. Il y aura le mois prochain un petit symposium sur la turbulence de l'eau. Si vous deviez faire des résultats avec votre instrument dans l'eau, je pourrais attirer l'attention sur cette application qui sera à nouveau de grand intérêt scientifique. De ce point de vue-là, pourriez-vous me donner toute information sur tout travail récent ou ancien sur les mesures expérimentales de la turbulence dans l'eau." [Frenkiel à Martinot-Lagarde, le 7 avril 1952, Archives de l'ONERA Lille] [60]

Malheureusement, nous n'avons pas trouvé les lettres de Martinot-Lagarde à Frenkiel. Par conséquence, à l'heure actuelle, nous n'avons pas d'informations

anemoclimometers either from your Laboratory or from some French constructor with whom you might connected."

60. "I am trying to convince some of the instrument constructors in this country of the desirability of developing anemoclinometer for meteorological and fluid dynamics use. For the moment, the reaction is very favorable. I should like to ask you if the anemoclinometer in its present form or as initially constructed has been patented. If no patents, were taken, you might like to consider taking out one, if it is not too late to do so. I wonder if you have any results of measurements with the anemoclinometer. I believe that is might be vey desiderable to publish something concerning the measurement of the stress tensor. If you should have some recordings, I could use them here on high-speed computing machines and obtain, I hope, quite interesting results.
Have you have any information concerning the application of the anemoclinometer in water ? I believe that such an application will be of particular interest. There will be next month a small symposium on water turbulence. If you should have any results made with your instrument in water, I could attract attention to this application which will again be of great scientific interest. At this point of view, could you give me any information about any other recent or old work on experimental measurements of turbulence in water."

concernant les applications de l'appareil dans l'eau. Cependant, nous sommes certains que les deux scientifiques, en collaboration avec Fauquet, perfectionneront l'instrument avec quelques modifications comme la réduction de la tête sphérique de 80 mm à 30 puis 15 mm. Les résultats seront publiés en 1952, sous le titre *The IMFL Anemoclinometer. An Instrument for the Investigation of a Fluctuating Velocity Vector* [Martinot-Lagarde et. al. 1952], en stimulant davantage l'intérêt de la communauté scientifique américaine de l' American Institute of Physics à l'égard de l'instrument.

3.5 Mathématiciens et travail en équipe : Kampé de Fériet en tant qu'expérimentateur

Après avoir montré le changement d'approche des théoriciens (Wehrlé et Dedebant) au problème de la mécanique des fluides et les efforts des expérimentateurs (ingénieurs et physiciens de l'IMFL) pour perfectionner l'outillage scientifique, cette section précédente montre le dernier facteur marquant le rapprochement de la théorie à la pratique : l'implication des mathématiciens dans le travail en équipe des laboratoires de mécanique des fluides. C'est à ce propos que nous nous penchons maintenant sur Kampé de Fériet en tant qu'expérimentateur. Si dans la section nous avons analysé le rôle important qu'il joue dans la légitimation expérimentale des théories de l'"école de Wehrlé et Dedebant", dans cette section nous allons approfondir cet aspect dans le cas de la turbulence atmosphérique, en montrant d'autres travaux de nature expérimentale où sa participation est extrêmement active. Cela met en lumière un exemple de collaboration très vivace parmi des scientifiques avec un arrière-plan différent, collaboration conduite dans le même esprit que celui avec lequel les mathématiciens comme lui ont collaboré dans les institutions militaires pendant la guerre [61].

3.5.1 L'enregistrement cinématographique des mouvements des nuages

Les techniques d'enregistrement que Kampé de Fériet avait apprises à Gâvre en collaboration avec Gabriel Foex ne se limitèrent pas à la balistique expérimentale et à la guerre. Depuis 1933, le mathématicien lillois se passionnait de nouveau pour les applications du cinéma pour étudier un autre problème à caractère expérimental : les mouvements des nuages (cf. annexe A). Dans le cadre de ce travail, où l'on retrouve des intérêts et des méthodes cultivés durant sa mobilisation

61. A ce propos voir le premier chapitre.

scientifique à Gâvre, il participa activement à la première personne dès avant la création de la Commission de la Turbulence Atmosphérique :

> *J'ai moi même* depuis 1933 systématiquement utilisé les nuages comme méthode de visualisation des mouvements atmosphériques, méthode évidemment critiquable puisque la présence du nuage perturbe l'atmosphère, mais néanmoins très intéressante puisqu'elle est la seule à pouvoir nous donner des renseignements sur les mouvements d'une portion suffisamment étendue de l'atmosphère [Kampé de Fériet 1936a, 29]

Les moyens utilisés dans les souffleries ou les canaux hydrodynamiques sont inapplicables dans l'écoulement concernant l'atmosphère et c'est pour cette raison qu'il exploita "le procédé de visualisation que nous offre la nature elle-même et qui est constitué par les nuages" [Kampé de Fériet 1937c, 200]. En effet, sa méthode se fonde sur l'idée que les gouttelettes d'eau des nuages (de 0.1 à 0.01 mm normalement) ont des vitesses très lentes par rapport à l'air et leur mouvement est presque similaire au mouvement de l'air qui les amène. Au contraire de ce qui passe dans les laboratoires aérodynamiques, les mouvements des nuages ont une vitesse de quelques mètres par seconde et s'observent à des distances de plusieurs kilomètres. Afin d'enregistrer leur mouvement, Kampé de Fériet utilisa une technique cinématographique qui lui permettait d'accélérer la projection normale de l'évolution des nuages observée, de 20 à 200 fois par exemple. Cette technique d'application du cinéma aux nuages n'est pas nouvelle et date du début de la technique cinématographique. Pour ce qui concerne les techniques pour accélérer les mouvements des nuages observés en accélérant ou en ralentissant la prise de vue, nous pouvons trouver cette technique déjà en 1912 dans les publications du Meterological Office de Londres concernant les campagnes effectuées en 1911 à Sheringham, et plus tard, dans les travaux de L. Gain (1925), P. Idrac (1933), A. Métral (1934), Schmidt (1935), Blech (1930) et d'autres encore.

La plupart des campagnes ainsi que la comparaison des résultats des films avec des essais dans la soufflerie horizontale de l'IMFL, furent conduites par Kampé de Fériet en collaboration avec l'ingénieur A. Descamps de l'Institut Royal Météorologique de Belgique (IRM). Les campagnes aérologiques effectuées à l'aide de cette technique furent nombreuses et incluaient celles en Haute-Savoie autour du Mont Blanc, dans l'Oberland Bernois à la Station Scientifique de Jungfraujoch [Descamps 1937b] [62], en Auvergne dans le centre National de Vol sans Moteur de

62. Cette station scientifique fut fondée et inaugurée par les savants suisses et administrée par la Société Helvétique de Sciences Naturelles. Tous ceux qui étaient intéressés par effectuer des recherches sur les phénomènes atmosphériques à haute altitude pouvaient bénéficier de cet institut.

la Banne d'Ordanche et dans le Haut-Valais autour du Mont Cervin [Figure 3.9]. Pendant ces campagnes, il utilise ses techniques cinématographiques pour étudier les mouvements des cumulus (Banne d'Ordanche), les mouvements périodiques qui animent les tours cumuliformes (Mont Blanc et Jungfraujoch), et l'étude de l'écoulement autour d'une montagne isolée de forme géométrique simple (Mont Cervin) [Descamps 1937a].

Pour ce qui concerne l'écoulement autour du Mont Cervin, l'étude avait donné des résultats remarquables grâce à la forme géométrique de la montagne qui est comparable à un tétraèdre avec un sommet de 4.505 m ainsi qu'aux conditions atmosphériques particulières qui ont rendu visible le nuage de sillage. De plus, le tourbillon qui se forme dans la face au vent est un tourbillon hélicoïdal analogue aux tourbillons marginaux des ailes d'avions.

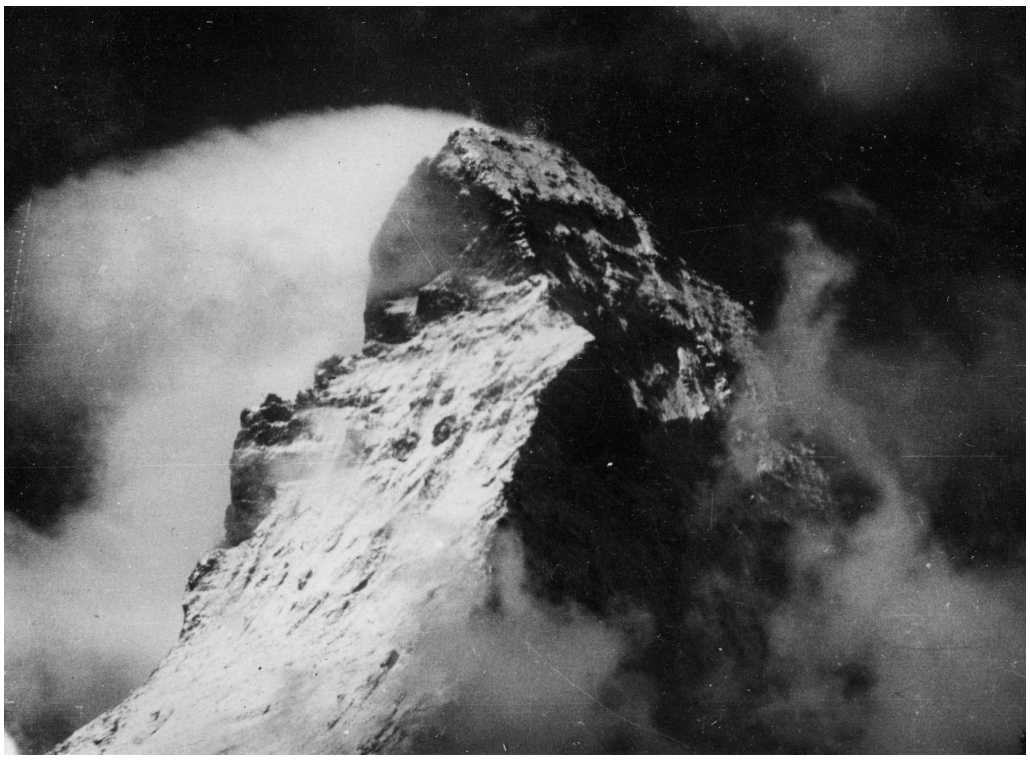


FIGURE 3.9 – Nuage de sillage du Mont Cervin (4505 m), prise de vue de J. Kampé de Fériet [Archives de l'ONERA Lille].

Cette forme géométrique régulière rendit assez simple la comparaison entre l'écoulement déduit des films et l'écoulement observé autour de la maquette du Cervin placée dans la soufflerie horizontale de l'IMFL. Malgré la grande proportion, les conditions de similitude du nombre de Reynolds $\mathfrak{Re} = \frac{Vd}{\nu}$ sont respectées

si, pour les deux écoulements, l'on prend comme valeur du coefficient de viscosité ν la valeur qui correspond à l'échelle des mouvements étudiés : à l'échelle de la soufflerie la viscosité moléculaire alors qu'à l'échelle des tourbillons un coefficient ν l'ordre de 10^4 ou 10^5 (viscosité turbulente). D'après ce point de vue, qui vient des travaux sur l'échelle de Wehrlé et Dedebant, le nombre de Reynolds devient alors du même ordre de grandeur pour la maquette et le mont Cervin. Sous ces hypothèses, il montra que les résultats sont en accord avec ceux obtenus en soufflerie.

A partir de 1938, Kampé de Fériet perfectionnera sa technique en utilisant deux appareils cinématographiques au lieu d'un seul, de façon à pouvoir obtenir une trajectoire tridimensionnelle dans l'espace. Sa méthode fut très appréciée surtout en Allemagne. Là, il aura plusieurs occasions de présenter ses recherches lors de conférences organisées par l'ISTUS (Internationalem Studienkommission für des motorlosen Flug) et parues dans la revue *Mitteilungsblatt* [Kampé de Fériet 1937c] et [Kampé de Fériet 1938]. Il s'agit d'une commission internationale d'étude du vol sans moteur fondée (1931) et présidée par le professeur Walter Georgii [63]. Elle comprenait les délégués de plusieurs nations entre autres l'Allemagne, la Belgique, l'Italie, l'Espagne, la France, l'Angleterre, les États-Unis, l'Autriche, la Pologne, les Pays Bas et la Hongrie. Les membres, appartenant à divers milieux scientifiques et techniques, étaient des professeurs, ingénieurs, pilotes de vol à voile sans moteur et pilotes de l'aviation militaire. Ils se réunissaient chaque année à Berlin pour montrer leurs recherches. Kampé de Fériet représentait la France en tant que membre de l'ISTUS de 1935 à 1939.

3.5.2 Une participation active aux campagnes aérologiques

Les techniques cinématographiques mises en place par Kampé de Fériet seront utilisés par lui-même pour l'étude des nuages lors des explorations aérologiques du Col de Voza [Figure 3.10] organisées par le Club Alpin Français [Descamps 1940] en plus que celles du Centre National de Vol sans Moteur de la Banne d'Ordanche organisées par la Commission de la Turbulence Atmosphérique [Kampé de Fériet 1938].

63. Walter Georgii (1888-1968) fut un professeur de météorologie de l'Institut de Technologie de Darmstadt en Allemagne. Pendant la guerre, il a collaboré activement en tant que membre exécutif du Commando de la Recherche en Aviation (Forschungsführung des Luftfahrt) et en 1946 fut nommé ingénieur-conseil du Service Technique du Ministère de l'Air-Paris. En 1948, il quittera l'Allemagne pour devenir professeur d'aéro-physique et directeur du Département des Recherches de l'Université de Mendoza, en Argentine. Sur sa biographie voir [Hirschel et. al. 2012, 62].

Figure 3.10 – A. Martinot-Lagarde, J. Kampé de Fériet et leurs collaborateurs pensant la campagne aérologique du Col de Voza (Mont Blanc), 19-30 juillet 1939 [Archives de l'ONERA Lille]

Lors de ces campagnes aérologiques le rôle de Kampé de Fériet au sein de l'équipe de l'IMFL est très active. Au Col de Voza, en plus de la direction de la campagne aérologique, Kampé de Fériet effectuait des prises de vues au ralenti des nuages selon sa technique. De plus, il se chargeait de réaliser les programmes des travaux pratiques et de préparer des exposés théoriques sur la météorologie. Même à la Banne d'Ordanche il participait activement au travail en équipe. Là, il collaborait au sein de l'équipe de Paul Dupont pour effectuer plusieurs mesures en vol à l'aide d'un "avion laboratoire" mis à disposition par la commission de la Turbulence Atmosphérique, le Potez 540. Il s'agit d'un multiplace avec des dimensions importantes (envergure 22,2 m, masse 7 tonnes) doué d'une grande stabilité permettant de séparer facilement les perturbations atmosphériques des celles dues à l'avion même. Il disposait d'un accélérographe Baudouin mesurant les accélérations à l'axe de giration de l'avion ; d'un appareil Askania enregistrant la pression, la vitesse, la température et l'inclinaison de l'appareil par rapport à la verticale ; un météorographe O.N.M mesurant la température, la pression et l'état hygrométrique ; l'anémoclinomètre IMLFL pour la grandeur de la vitesse relative de l'air et les deux angles d'incidence et dérapage [Kampé de Fériet 1937a, 39]. Dans ce contexte, Kampé de Fériet avait souvent le rôle d'observateur dans la

tourelle, en photographiant le ciel et en examinant les conditions météorologiques qu'il vérifiait ensuite pendant les mesures en vol, grâce à l'exploitation des ses techniques cinématographiques des mouvements des nuages.

La première campagne eut lieu à la Banne d'Ordanche pendant le mois de septembre 1936 avec 16 séances de vol du Potez 540 d'une durée totale de 25 heures. Les vols étaient faits à différentes altitudes et conditions météorologiques qui étaient contrôlées par l'ONM et l'IMFL dans leur petit laboratoire installé au sol du centre [64]. La deuxième, en 1937, impliqua l'utilisation de deux autres avions, le Potez 25 pour les sondages météorologiques et le Potez 58 pour les mesures au voisinage du sol. Ce dernier avion et un pilote furent mis à disposition de l'IMFL par le ministre de l'Air Pierre Cot, qui manifesta un grand enthousiasme pour les activités de l'institut lors de sa visite du 11 mars 1937. Cet avion fut utilisé par l'IMFL également pour des campagnes aérologiques dans le Nord-pas-de Calais. Enfin, en collaboration avec les services anglais, il étudia, de décembre 1939 à mars 1940, les conditions atmosphériques de la Hamada saharienne, un plateau rocailleux surélevé des zones désertiques du Sahara [Kampé de Fériet 1942]. Plus précisément, il analysa comment la courbe des températures se modifie rapidement après le lever du soleil dans les couches basses de l'atmosphère. En effet, à la fin d'une nuit claire, la température de l'atmosphère présente une inversion, c'est à dire qu'à partir du sol jusqu'à une certaine altitude H elle croit avec l'altitude. Dès que le soleil se lève, si le ciel est clair, la courbe de température se modifie rapidement et au lever du soleil l'inversion s'efface progressivement vers le sol. C'est le phénomène de l'effacement de l'inversion de la température. Dans ce contexte, il essaya de poser la base théorique de ce problème pour en tirer une méthode de calcul numérique permettant en fonction des données expérimentales de prévoir l'allure de cette courbe. Ses travaux expérimentaux se poursuivront pendant la seconde guerre mondiale comme nous le montrerons dans le dernier chapitre.

3.6 Conclusions

Dans ce chapitre, nous avons examiné le cas de l'école de Wehrlé et Dedebant, de l'IMFL et de Kampé de Fériet afin de montrer que même en France, comme c'est le cas dans d'autres pays (Allemagne, États-Unis, Grand Bretagne, Russie et Pays-Bas), on assiste, pendant l'entre-deux-guerres, à un rapprochement plus marqué entre la théorie et la pratique en mécanique des fluides. Plus précisément, nous avons vu que l'école de Wehrlé et Dedebant, l'IMFL et Kampé de Fériet

64. Les résultats détaillés de ces recherches se trouvent dans le rapport de Dupont [Dupont 1938].

font ressortir trois éléments marquant de ce rapprochement, respectivement le changement d'approche au problème de la mécanique des fluides, qui est plus attentif aux aspects expérimentaux, le perfectionnement de l'outillage scientifique dans les laboratoires et l'implication des mathématiciens au sein des travaux en équipe dans ces structures, dans le même esprit que celui conduit pendant la mobilisation scientifique pendant la Grande guerre.

Kampé de Fériet était un grand promoteur de l'approche expérimentale non seulement dans le monde de la recherche mais aussi dans celui de la formation. D'après lui, la formation aéronautique doit être présente dans les divers ordres d'enseignement (primaire, secondaire, technique, supérieure) et son but pourra être obtenu seulement si elle a avant tout un caractère expérimental, concret, très simple, toujours tourné vers les applications pratiques [Kampé de Fériet 1936b, 771]. Afin de reprendre en main le problème de l'enseignement aéronautique dans les écoles, il incita la France à prendre comme modèle l'Allemagne qui avait une conception de collaboration plus vaste et "totalitaire" entre aéronautique et école [Kampé de Fériet 1936b, 770], qui prenait en compte tous les degrés de l'enseignement, des écoles primaires aux universités. C'est pourquoi que Kampé de Fériet organisa dans l'IMFL un laboratoire sous la responsabilité de Guillemet pour la création d'une série d'appareils pédagogiques afin que le personnel enseignant puisse les distribuer dans les écoles. En effet, dans son rapport sur le fonctionnement de la formation en aéronautique dans le système d'éducation allemand, il souligne le rôle que ce domaine joue du point de vue de la culture scientifique, du point de vue sportif, mais aussi pour l'apprentissage manuel et l'initiation au travail en équipe [65].

Pour ce qui concerne l'école de Wehrlé et Dedebant, si au début leur théorie donnait une représentation statistique du fluide à l'aide de la fonction de distribution f et des courbes de fréquence, à partir des années 1940, leur approche bascule vers la conception de la mécanique aléatoire, dont la théorie de la turbulence de Taylor-Von Kármán n'est que l'une des applications. Cette théorie, reposant sur les concepts de corpuscule et connexion aléatoires, revêtira de plus en plus des habits philosophiques bien qu'elle se soit appuyée au départ sur des recherches concrètes. Plus précisément, ils orientent leurs recherches vers un *Weltbild* aléatoire ultime capable de représenter les branches de la physique et de la mécanique, à la fois au niveau microscopique et macroscopique. L'outil pour le représenter sera l'analyse aléatoire basée sur la double dérivabilité en moyenne quadratique. Ainsi, sur la base de leur mécanique aléatoire, ils réinterprètent la mécanique statistique, la

65. Voir le rapport *L'aéronautique et l'école en Allemagne*, le 30 mai 1936, [Archives départementales du Pas-de-Calais, 81 J 1, Fonds Châtelet]

relativité d'Einstein, la mécanique quantique, ondulatoire, l'électromagnétisme, la météorologie, la mécanique des fluides et d'autres disciplines. D'après eux, *l'Univers aléatoire* est la base solide sur quoi reconstruire au moyen de l'Analyse aléatoire toute la physique théorique en tant que physique aléatoire. Leurs idées sur l'univers aléatoire sont recueillies dans un livre d'environ 450 pages publié en 1945 dont l'étude mériterait d'être approfondie par les historiens ou les philosophes des sciences [Wehrlé 1956].

Toutefois, il semble que ce choix de faire évoluer la théorie de la turbulence dans cette direction ne semble pas reconnu et partagé par le reste de la communauté internationale de mécanique des fluides, qui développe la théorie de Taylor-Von Kármán sous une perspective différente, fondée sur une probabilisation de la mécanique des fluides turbulents à l'aide de la théorie des fonctions aléatoires de l'école russe de Kolmogorov ou de l'école américaine de Wiener, lesquelles avaient apporté à ces fonctions une définition rigoureuse du point de vue mathématique. D'après Jean Bass, qui participera aux développements des recherches de Wehrlé et Dedebant, la définition de fonction aléatoire utilisée par l'école française était peu précise mais suffisait pour l'utilisation qui leur était réservée [Bass 1999]. Il s'agissait de donner une interprétation en langage aléatoire de la théorie de Taylor-Von Kármán et des propriétés du fluide plutôt qu'une mathématisation rigoureuse à l'aide d'une définition bien précise de fonction aléatoire dans le domaine du calcul des probabilités qui permettaient de d'étudier l'évolution du mouvement d'une seule particule choisie au hasard dans un ensemble probabilisé de tous ses mouvements possibles. C'est l'idée statistique qui est à la base de leur définition, non pas le calcul des probabilités :

> "Les applications du calcul des probabilités à la physique ont donné lieu à des critiques sévères, en particulier de la part de Duhem, le champion de l'énergétique axiomatique. Duhem n'avait pas entièrement tort ; la théorie cinétique manque assurément de rigueur (ainsi la démonstration du célèbre théorème H de Boltzmann doit être considérée comme inexistante). Mais tandis que le "*Calcul des Probabilités*" n'a guère été au début que l'étude raisonné des jeux de hasard, la "statistique mathématique" d'aujourd'hui est un corps de doctrine autonome tenant une large place au sein de la science mathématique. On pourrait la développer comme un important chapitre de la Théorie des Ensembles, sans que les mots "hasard" ou "probabilité" soient jamais prononcés. Pourtant il est utile de conserver ces expressions et de parler "en langage de probabilités" parce que le dessein profond de la statistique est bien de vouloir représenter les phénomènes du "hasard" dont nous avons par ailleurs la notion expérimentale " [Dedebant et

Wehrlé 1944b, 96]

Ces idées fondées sur le concept que le dernier étage de perturbation est celui où les particules d'un fluide turbulent coïncident avec les molécules, se développent dans un contexte encore prématuré qui ne prend pas encore en compte l'échelle de Kolmogorov, l'échelle tourbillonaire la plus petite de la turbulence qui est de l'ordre de 0,1 mm alors que celle moléculaire est de l'ordre de 1 nm, ce qui rend difficile une analogie entre les phénomènes moléculaires et la turbulence. De plus, même la conviction selon laquelle la composante d'agitation de la vitesse d'un fluide doit être traitée comme une variable aléatoire et représentée par une courbe de fréquence et non pas comme une fonction régulière n'a pas eu un énorme succès. Elle semble être oubliée sans avoir un fort impact réel parmi leurs contemporains et successeurs dont une partie a continué à traiter la vitesse turbulente comme une fonction dérivable et continue alors qu'une autre partie a commencé à l'étudier comme une fonction aléatoire au sens de Kolmogorov ou de Wiener. Dans le livre *The theory of homogeneous turbulence* de Batchelor, publié en 1953 et encore utilisé aujourd'hui, l'élève de Taylor explique que la viscosité régularise les fluctuations à petite échelle (l'échelle de Kolmogorov) et que "on the whole it seems probable that the mathematical techniques devised to cope with the three-dimensional character of the velocity field are not far from their optimum form" [Batchelor 1953, 13]. Dans la suite du livre, le caractère éventuellement discontinu des champs turbulents n'intervient pas. Cependant, il faut reconnaître à cette école le mérite d'être l'une des premières à avoir dirigé les spécialistes de la mécanique des fluides vers une approche probabiliste, en d'autres termes, à avoir associé les instruments du calcul des probabilités à la mécanique des fluides, ce qui était révolutionnaire à l'époque.

En 1939, Wehrlé, Métral et Kampé de Fériet avaient proposé au ministère de l'Air de mettre les connaissances d'aérologie de la Commission au service de la guerre, mais leur proposition n'a pas été concrétisée et, une année plus tard, la Commission cessera son activité. L'école française de la turbulence se dissout rapidement après la guerre. L'ingénieur Régis Juvanon Du Vachat (Météo France), dans son article sur la mécanique des fluides turbulents de Wehrlé et Dedebant, commente la fin de cette école avec les mots suivants :

> "le groupe constitué autour de Wehrlé s'est disloqué à la Libération et l'on a volontairement oublié ces divers travaux par suite d'une attitude de rejet envers les recherches théoriques et parce qu'il fallait faire une démonstration d'idées plus pragmatiques sur la scène internationale" [Juvanon du Vachat 1995, 161]

En même temps, leurs travaux n'étaient pas suffisamment connus par les autres spécialistes de mécanique des fluides, d'après ce qu'avoue Wehrlé dans son livre

de 1945 :

> "Nous confessons notre erreur de ne pas être préoccupés de la diffusion de nos idées, de n'avoir publié que des notes trop elliptiques à l'Académie des Sciences et des mémoires disséminés dans des recueils plus ou moins confidentiels" [Wehrlé 1956, 49]

En 1943, Dedebant quitte l'ONM pour passer deux ans au Portugal, dans le laboratoire de Physique de la Faculté des Sciences de Lisbonne dirigé à l'époque par les professeur Cyrillo Soares. Ensuite, il rejoindra l'université de la Plata, en Argentine. Par contre, Wehrlé est resté en France, dans le Sud-Est, jusqu'à sa mort en 1965 [Juvanon du Vachat 1995, 162].

Quant à Kampé de Fériet, nous avons vu que son rôle est marginal en ce qui concerne le développement théorique des idées de Wehrlé et Dedebant. En effet, nous verrons dans le prochain chapitre que ses contributions mathématiques à la théorie de la turbulence-à partir de la fin des années 1930- suivent la même direction que celles conduites par la communauté internationale de mécanique des fluides. Son approche est une approche probabiliste visant à donner un formalisme mathématique à la théorie de Taylor-Von Kármán. Si chez Wehrlé et Dedebant le support des idées était la théorie cinétique des gaz et la statistique, chez Kampé de Fériet il s'agit plutôt du calcul des probabilités et de l'analyse harmonique. Ses publications mentionnent les travaux de Dryden, Taylor, Von Kármán, Prandtl. Même s'il utilise, comme Wehrlé et Dedebant, la définition de dérivée aléatoire de Slutsky, les deux ingénieurs ne sont mentionnés que pour mettre en évidence d'où vient son inspiration de l'utilisation d'une approche probabiliste. De plus, les publications de Kampé de Fériet sont bien appréciées et acceptées par la communauté scientifique développée autour des ICAM et de l'école américaine de Norbert Wiener, Théodore Von Kármán, Garrett Birkhoff. Les visites et les conférences de Kampé de Fériet dans les divers laboratoires aérodynamiques américaines ont permis à ce mathématicien de se faire connaître et de créer un réseau avec la communauté scientifique internationale. Nous examinerons tous ses aspects autour de la contribution mathématique de Bass et Kampé de Fériet dans le prochain chapitre.

Si la Commission de la Turbulence et l'école autour de Wehrlé et Dedebant vont disparaitre après la guerre, un autre centre se développera progressivement après le conflit : c'est le Laboratoire de Mécanique de l'Atmosphère (LMA) d'Alexandre Favre (1911-2005), rattaché à l'institut de mécanique des fluides de Marseille (IMFM). Ce physicien entra à l'IMFM en 1932 en tant qu'étudiant d'André Marchand afin de préparer une thèse sur l'écoulement autour d'un profil d'aile. Même si ce laboratoire fut fondé en 1947, les travaux sur la turbulence furent entamés à

l'IMFM déjà en 1941, année où le nouveau cours de mécanique de l'atmosphère météorologie de Favre débute pour la première fois à l'IMFM. Ensuite, Favre deviendra titulaire de cette chaire instituée par la Faculté des Sciences en 1951. C'est à partir de ce moment-là que l'institut commencera à entreprendre des recherches sur la turbulence d'un point de vue statistique à l'aide d'une soufflerie à faible turbulence, en suivant les développements des États-Unis comme ceux de la NBS et de Caltech. Le LMA dépend d'une part de la Faculté des Sciences, et d'autre part de l'IMFM et les recherches sont effectuées à l'aide de l'Office National d'Étude et de Recherche Aéronautiques (ONERA). Dans le laboratoire, les collaborateurs sont quatre ingénieurs de l'ONERA auxquels un mécanicien de l'IMFM et un ingénieur de la Météorologie Nationale sont adjoints. Les travaux sont principalement expérimentaux et concernent les méthodes de mesure statistique de corrélation dans le temps et dans l'espace et sur le spectre de l'énergie. En 1961, sur le conseil de Von Kármán, Favre fondera l'Institut de Mécanique Statistique de la Turbulence dont il sera directeur pendant vingt ans. Cet institut constituera un centre international d'excellence dans la France des années 1960-1980. Les contributions théoriques de Favre de cette époque, la méthode des corrélations spatio-temporelles et l'emploi d'une moyenne pondérée par la masse pour écrire les équations statistique de la turbulence remplaçant celles de Reynolds et Boussinesq marquent l'émergence d'une autre approche : l'approche numérique [Favre 1976].

Chapitre 4

La mathématisation de la mécanique des fluides entre 1920 et 1940

> Alors que la conception laplacienne du déterminisme assimilait l'Univers à un projectile infiniment complexe qui, lancé au départ d'une manière connue, devait suivre une trajectoire inéluctable et prévisible jusqu'à l'infini du temps, la nouvelle Physique ne permet à aucune conscience, si vaste et bien informée qu'elle soit, que des prévisions de probabilités, de plus en plus floues à mesure que le temps s'écoule.
>
> Paul Langevin (1935)

La mobilisation scientifique des mathématiciens pendant la première guerre mondiale a sans doute marqué le paysage mathématique moderne. D'un côté, la rupture avec tout ce qui concerne la guerre a ouvert les portes au bourbakisme ; de l'autre côté, la continuité avec elle a produit un intérêt renouvelé pour les mathématiques appliquées et leur institutionnalisation [1]. Dans ce dernier cas, toutefois, les mathématiciens étaient loin d'accepter les positions extrêmes utilitaristes que les allemands avaient pris à l'égard de la science en général. Paul Appell, par exemple, définissait le militarisme des sciences allemandes comme une "barbarie

1. A ce propos, voir le premier chapitre.

savante" [2].

Le refus de cette conception utilitariste chez les spécialistes de mathématiques appliquées est explicite aussi dans le domaine de la mécanique des fluides théorique française, en particulier chez Henri Villat, le chef de ce domaine. Comme nous avons vu déjà en ce qui concerne sa thèse [Villat 1911] [3], son hydrodynamique s'oppose à l'hydrodynamique "rudimentaire" des physiciens et ingénieurs [Tazzioli 2016, 283]. Elle est fondée sur des bases mathématiques solides provenant de l'analyse, qui concernent en particulier la théorie moderne des équations integro-différentielles et des fonctions de variables complexes. Son style consiste en la consolidation de l'édifice mathématique d'un phénomène physique plutôt qu'à l'utilisation des mathématiques pour étudier ses aspects physiques. En d'autres termes, faire de la recherche en donnant la priorité à l'idée d'applicabilité plutôt qu'à l'application. Après la guerre, ses travaux s'inscrivent dans la même approche et tournent autour de sa théorie mathématique de la résistance des fluides autour d'un obstacle entamée dans sa thèse : théorie des sillages, des tourbillons, et des fluides visqueux. La liste de ses publications, comprend un grand nombre d'articles mais aussi de manuels destinés au cours de mécanique des fluides professé dans les divers pôles de mécanique des fluides de la nation et à l'École Supérieure d'Aéronautique de Paris. A propos de son approche oscillante "entre l'abstraction de Scylla et l'utilitarisme de Charybde" [Aubin 2006, 20], David Aubin écrit :

> Le style de Villat était certainement une expression de la modernité mathématique. Mais contrairement au modernisme abstrait et formaliste identifié à l'avant-garde des mathématiques par la dernière génération bourbakiste, celui-ci reposait sur des calculs exacts et précis ainsi que sur l'utilisation audacieuse de l'analyse supérieure pour résoudre les problèmes technologiques modernes. Ce type de modernité était particulièrement bien représenté en France où l'utilité de l'analyse abstraite des applications mécaniques était très appréciée, ainsi que l'impact des préoccupations technologiques sur la même analyse pure. De telles complémentarités permettent des discours contemporains sur le rôle social du mathématicien. Comme l'écrivait le mécanicien Gabriel Kœnigs quelques années plus tard, «l'esthétique spéciale» de Villat était "l'heureuse réponse des applications à la théorie". [4] [Aubin

2. Sur le conflit idéologique entre pureté des mathématiques et utilitarisme dans les mathématiques appliquées de l'entre deux-guerres voir [Aubin 2006].

3. Voir le deuxième chapitre.

4. Villat's style certainly was an expression of mathematical modernity. But contrary to the abstract and formalist modernism that was identified with the forefront of mathematics by the later Bourbakist generation, this one relied on precise and exact computation and on the audacious use of higher analysis for the solution of modern technological problems. This type of modernity

2006, 13]

Comme Villat, d'autres jeunes mathématiciens de sa génération ne partageaient pas la pureté des méthodes des bourbakistes. C'est le cas, par exemple, de Paul Montel, d'Émile Borel, de Gaston Julia, de Jacques Hadamard et d'Élie Cartan qui préféraient aborder leurs problèmes mathématiques à l'aide des théorèmes modernes de l'analyse, en insistant sur les connexions entre les divers domaines mathématiques [5].

Cependant, nous sommes loin de réduire le paysage mathématique moderne à une vision dichotomique représentée d'un côté par les bourbakistes et leurs structures axiomatiques et de l'autre côté par les mathématiciens non bourbakistes qui refusent ce type d'abstraction, en s'appuyant sur une approche analytique qui prend cependant ses distances des applications concrètes. Il existe d'autres trajectoires professionnelles intéressantes qui couvrent le spectre continu des mathématiciens moins appliqués aux plus appliqués. Dans le cas de la mécanique des fluides théorique cela équivaut à dire qu'il y a d'autres approches à ce domaine et d'autres formes à sa mathématisation, qui sont plus ou moins appliquées que celle d'Henri Villat. Dans la direction des trajectoires tendant à des approches plus appliquées, un exemple est donné par Kampé de Fériet. Von Kármán dans une lettre à Hunsaker, un des organisateurs de l'ICAM de Cambridge (USA) en 1938 [6], écrit :

> Concernant les recommandations de Levi-Civita à propos des représentants français de la mécanique appliquée, je suis d'accord que Villat et Pérès sont d'excellents hommes ; Cependant, Villat est bien loin de la ligne de ce que nous appellerions la frontière de la mécanique utile ou appliquée.

was especially well represented in France where the usefulness of abstract analysis to mechanical applications was highly valued, as well as the impact technological concerns had on pure analysis itself. Such complementarities permeated contemporary discourses about the mathematician's social role. As the mechanician Gabriel Kœnigs wrote years later, Villat's "special esthetic" was the "happy answer of applications to theory."

5. Cette tradition, que plusieurs mathématiciens français revendiquaient, pourrait être rebaptisé sous le nom de *modèle à la française* en empruntant cette expression à Julia [Aubin et. al. 2014, 165]. D'après [Aubin et. al. 2014] "cette position était supportée par l'idée largement partagée selon laquelle le mot "français" voulait dire universel" [Aubin et. al. 2014, 165]. S'agit-il d'un sentiment de nationalisme ou d'une véritable façon de faire les mathématiques qui se distingue effectivement de celle des autres nation ? En effet cette façon de faire les mathématiques n'était pas un aspect exclusif de la France si nous pensons par exemple aux italiens comme Levi-Civita et ses étudiants.. Conscients de l'importance de ce type de questions, nous sommes néanmoins obligés à poursuivre l'objectif de la thèse, en donnant la priorité à une étude visant à comprendre l'impact de cette façon de faire les mathématiques sur la mécanique des fluides plutôt qu'une enquête de sa nature.

6. Lettre reproduite dans [Tazzioli 2016, 284].

> Je crois vraiment que l'homme qu'il nous faut pour une conférence générale est Kampé de Fériet, directeur de l'institut de mécanique des fluides de Lille. Au cours des dernières années il a publié deux comptes rendus sur les récents progrès concernant les vagues et la turbulence. Les deux rapports étaient excellents et juste à la limite entre le point de vue théorique et pratique comme nous voudrions qu'il soit.
> Par ailleurs, il suit la recherche expérimentale, alors que Villat, en dépit du fait qu'il est directeur d'une institution expérimentale, n'a aucune idée des questions expérimentales". [7]

Au début, les premières recherches d'hydrodynamique de Kampé de Fériet étaient dans le même esprit que celles d'Henri Villat : rigueur mathématique à l'aide de nouvelles théories de l'analyse, l'importance de l'idée d' applicabilité, et l'étude des solutions exactes de quelques problèmes d'hydrodynamique concernant l'écoulement d'un fluide visqueux ou la résistance d'un fluide. Ce type d'approche dérive de ses compétences en analyse acquises à la Sorbonne où il suit les cours de Lebesgue et Goursat, et qui se manifestent lors des ses premières recherches effectuées en collaboration avec Appell. De plus, il s'était déjà familiarisé avec la sphère des applications de l'analyse pendant sa mobilisation à Gâvre [8]. La situation change en 1933 au moment où il commence à s'intéresser à la turbulence anglo-américaine autour de Taylor et von Kármán [9]. C'est en effet en 1933 qu'il entreprend ses premiers travaux expérimentaux sur la turbulence atmosphérique autour de l'enregistrement cinématographique des mouvements des nuages et c'est en 1933 que remonte sa première lettre envoyée à von Kármán. Cette lettre marque le début d'une correspondance qui perdurera jusqu'en 1946, une correspondance qui montre un rapprochement toujours plus intense de Kampé de Fériet envers les recherches sur la turbulence de l'école de von Kármán. Sa première publication sur ce sujet, *l'état actuel du problème de la turbulence* remonte à 1934 et vise à dresser un panorama international assez détaillé des recherches effectuées sur ce sujet durant les années 1930, en décrivant les travaux de Prandtl, de Burgers, de von Kármán, de Taylor et d'autres spécialistes de la théorie de la turbulence de cette époque. Il s'agit d'un développement d'une communication présentée par

7. "Concerning Levi-Civita's recommendation of French representatives of Applied Mechanics, I agree that Villat and Pérès are excellent men ; however, Villat is far beyond the line of what we would call the frontier of useful or applied mechanics. I really believe that the man we could use best for a general lecture is Kampé de Fériet, director of the Institute for fluid mechanics, in Lille. In the last years, he published two reviews on recent progress concerning waves and turbulence. Both reports were excellent and just on the limit between the practical and theoretical viewpoint as we like it. Besides that, he follows the experimental research, whereas Villat, in spite of the fact that he is director of an experimental institution, has no idea of experimental questions".

8. Voir le premier chapitre.

9. Sur l'historiographie concernant la turbulence voir le chapitre 3.

l'auteur à la Société Française de Navigation Aérienne le 8 février 1933. Outre ses échanges scientifiques avec von Kármán, un autre facteur qui a favorisé l'orientation de ses intérêts scientifiques vers la théorie de la turbulence est sans doute sa participation active aux ICAM à partir du congrès de Zurich qui eut lieu en 1926. Pendant ce congrès et surtout durant celui suivant tenu à Stockholm en août 1930 "il a été frappé par la valeur des travaux accomplis dans ce domaine par l'école allemande (von Kármán, Prandtl et von Mises), l'école scandinave (Professeur Oseen) et par l'école italienne (dominée par la personnalité éminente du professeur Levi Civita)" [10]. Cet intérêt pour la théorie de la turbulence fut tout de suite cultivé grâce à sa désignation en tant que membre de la Commission de la Turbulence Atmosphérique en 1935 et grâce à ses liaisons scientifiques avec l'école de Wehrlé et Dedebant.

Dans ce contexte l'approche de Kampé de Fériet entre théorie et pratique est, pour reprendre les mots de von Kármán, "comme nous voudrions qu'il soit" : pourquoi ?
Tout d'abord, au contraire de Villat, ce mathématicien contribue à la mécanique des fluides expérimentale en plus de sa partie théorique. D'un côté, il entreprend des travaux en équipe avec ses collaborateurs de l'IMFL, travaux qui incluaient des campagnes aérologiques à la Banne d'Ordanche, des études sur l'inversion de la température dans les couches basses de l'atmosphère du Sahara, et des enregistrement des nuages dans le Mont Cervin. De l'autre côté, il participe à l'ensemble des essais effectués pour le perfectionnement de l'outillage scientifique, et la légitimation de la théorie de Wehrlé et Dedebant dans les laboratoires de l'IMFL, en apportant une contribution non négligeable au contexte du rapprochement de la théorie à la pratique dans la mécanique des fluides des années 1930 impliquant von Kármán, Taylor, Prandtl et plus en général la communauté internationale de mécanique des fluides. Nous avons abordé ces aspects dans le troisième chapitre.

Ensuite, même sur le plan théorique, à savoir celui de la mécanique des fluides mathématique, Kampé de Fériet est "comme nous voudrions qu'il soit" et se distingue de Villat. Vers la fin des années trente - après sa période en tant qu'expérimentateur au sein de l'école de Wehrlé et Dedebant - il quittera l'étude des fluides parfaits et des solutions exactes des équations de Navier-Stokes à l'aide de l'analyse pour contribuer à l'introduction d'un usage rigoureux du calcul des probabilités et des fonctions aléatoires dans les fluides turbulents décrits par la théorie de Taylor-von Kármán. De ce point de vue-là, sa mathématisation de la mécanique des fluides s'éloigne de celle de Villat et se rapproche plus de celle de von Kármán, en suivant les mêmes objectifs et le même esprit que ceux que le savant

10. Annales de l'Université de Lille 1930, page 56

américain définit comme "*real applied mathematician*". Sa priorité est de concevoir et de fournir des outils mathématiques "utiles" au domaine de l'ingénierie et de la physique afin de faire progresser ces domaines [11].

Von Kármán donne cette définition dans son article *Tooling up mathematics for engineering* [von Kármán 1943]. Il s'agit d'une sorte de discours "sophiste" entre un mathématicien et un ingénieur à propos du rôle des mathématiques dans la compréhension de la nature. D'après l'ingénieur, "le développement de l'analyse mathématique ne peut pas être séparé du développement de la physique et surtout de la mécanique" et "l'esprit abstrait du mathématicien n'intervient qu'après qu'un grand travail ait été fait ; l'effort pour combler certaines lacunes logiques vise à systématiser et codifier l'abondance des méthodes et théorèmes que les géants de la période précédente ont créés par une combinaison des pensées logiques et d'intuition créative" [von Kármán 1943, 3]. [12] D'après le mathématicien ce raisonnement est réducteur et il lui explique sa prise de distance de toutes conceptions utilitaristes des mathématiques et donc de sa condition d'être au service des domaines de l'ingénierie et de la physique :

> "il me semble que vous sous-estimez l'importance de ce que vous appelez la systématisation et la codification". Ne pensez-vous pas qu'afin d'assurer l'application correcte des équations différentielles, il était une absolue nécessité de définir exactement ce que nous entendons par un processus limitatif ; ou n'était-il pas absolument nécessaire de donner un sens réel à des termes tels que l'infiniment petit et l'infiniment grand ?" [von Kármán 1943, 3] [13]

Après plusieurs exemples montrant les convictions de l'un ou de l'autre, les deux trouvent finalement un point en commun dans leur débat lorsque l'ingénieur avoue que toutes les questions pratiques requièrent des considérations mathématiques compliquées :

11. Précisons au lecteur que ni von Kármán, ni Kampé de Fériet déclarent explicitement que ce dernier est un "*real applied mathematician*". Cela est juste une "étiquette" qui relève de notre interprétation de sa mathématisation de la mécanique des fluides.

12. "the development of mathematical analysis cannot be separated from the development of physics and especially of mechanics" et "the abstract minded mathematician step in after big job was done ; the endeavored to fill certain logical gaps, to systematize and codify the abundance of methods and theorems which the giants of the foregoing period created by a combination of logical thinkings and creative intuition".

13. "it seems to me that you underestimate the importance of what you call systematization and codification". don't you think that in order to assure the correct application of calculus and differential equations, there was an absolute necessity to define exactly what we mean by a limiting process ; or, was it not aboslutely necessary to give a real sense to such terms as infinitely small and infinitely large ?"

> "Je pense que nous avons vraiment besoin de mathématiciens qui nous aident à affiner et, si vous voulez, à critiquer et systématiser nos méthodes intuitives. En fait, les applications réussies des mathématiques à l'ingénierie exigent la coopération étroite des mathématiciens et des ingénieurs. Cela n'est aucunement un travail de routine que de reconnaître les relations mathématiques communes sous-jacentes dans des champs en apparence très différents. Le mathématicien qui a l'intention de faire de la recherche en mathématique appliquée doit avoir un bon sens pour les processus physiques en jeu. D'un autre côté, l'ingénieur doit aller dans le cœur des fondements de l'analyse, à une profondeur considérable, afin d'utiliser correctement les outils mathématiques. Un assemblage arbitraire des machines-outils ne constitue pas un atelier d'usinage efficace. Nous savons qu'il existe de puissantes machines-outils dans votre arsenal mathématique. La tâche pour nous est de savoir les adapter et les appliquer" [von Kármán 1943, 5]. [14]

Le mathématicien approuve cette remarque mais en même temps il place cette question sur le rôle des *mathématiques* dans les applications de l'ingénierie et non pas sur la dualité mathématicien (fournir les outils)-ingénieur (appliquer les outils) : c'est là qu'il définit les "real applied mathematician" :

> "Je pense que vous avez quelque chose là. Pour poursuivre votre analogie, afin de donner une solution aux problèmes d'ingénierie en production, vous avez besoin des concepteurs de ces outils. *Ce sont les vrais mathématiciens appliqués*. Leurs arrière-plans initiaux peuvent différer ; ils peuvent provenir des mathématiques pures, de la physique ou de l'ingénierie, mais leur objectif commun est de "façonner" les mathématiques pour l'ingénierie " [von Kármán 1943, 6]. [15]

Ce statut de spécialiste de mathématiques appliquées peut être associé au pro-

14. "I think we definitely need mathematician who help us to refine and, if you wish to say so, criticize and systematize our intuitive methods. In fact, successful applications of mathematics to engineering require the close cooperation of mathematicians and engineers. It is by no means a routine job to recognize the underlying common mathematical relations in apparently very different fields. The mathematician who intends to do applied mathematical research has to have a pretty good sense for the physical processes involved. On the other hand, the engineer has to go into the fundamentals of analysis to a considerable dephth in order to use the mathematical tools properly. An arbitrary assembly of machine tools does not constitute an efficient machine shop. We know there are powerful machine tools in your mathematical arsenal. The task before us is to know to adapt and apply them"

15. "I think you've got something there. To carry your analogy further, in order to get the solution of engineering problems into production, you need some kind of tools designers. *These are the real applied mathematicians*. Their original backgrounds may differ ; they may come from pure mathematics, from physics of from engineering, but their common aim is to "tool up" mathematics for engineering".

fil du spécialiste de mathématiques appliquées suivant la tradition de Göttingen, ville où von Kármán et d'autres étudiants ont reçu leur formation sous la tutelle de Prandtl. En effet, dans cette ville, suite à la réforme de Klein du début du xx^{e} siècle et à la mobilisation scientifique pendant la guerre, une importante tradition des ingénieurs scientifiques commence à se développer dans les milieux académiques [16]. D'après ce que nous avons vu dans le troisième chapitre, l'ingénieur Prandtl et son étudiant von Kármán, le physicien Taylor, et les polytechniciens Wehrlé et Dedebant ont tous les caractéristiques pour appartenir à la catégorie des real applied mathématiciens si l'on constate leurs efforts dans l'introduction d'outils statistiques dans la mécanique des fluides théorique. Doués d'une forte préparation mathématique ou supportés par des mathématiciens (qui appartiennent encore à la catégorie des real applied mathematicians) qui collaborent avec eux [17], leurs recherches sont vues comme des recherches académiques traditionnelles mais qui en même temps sont effectuées pour des raisons technologiques extra-académiques impliquant l'industrie, l'aviation ou la sphère militaire.

A la suite de cette approche statistique de Taylor, Prandtl et von Kármán, une autre approche commence à prendre, surtout à partir de la fin des années 1930 : l'approche probabiliste fondée sur la théorie des fonctions aléatoires et les analogies avec le mouvement brownien. En effet, pendant l'entre-deux-guerres l'histoire de la mécanique des fluides est marquée profondément par la nécessité d'introduire non seulement des outils statistiques mais encore des outils du calcul des probabilités afin d'expliquer tous les phénomènes irréguliers qui causent une fluctuation aléatoire de la vitesse du fluide. En d'autres termes, le calcul des probabilités ouvre les portes à une nouvelle forme de mathématisation de la mécanique des fluides qui se met à côté (ou parfois dépasse) la vision déterministe des mathématiciens d'alors. L'historien Bernard Bru commente cette irruption probabiliste avec les mots suivants :

> "il se trouve en effet que la mécanique des fluides est l'un des domaines scientifiques où, dès la fin de la première guerre mondiale, les concepts probabilistes vont s'introduire et corrélativement se transformer et s'enrichir assez pour former à la fin des années trente, la théorie aléatoire de la turbulence mais aussi la théorie moderne des probabilités" [Bru 1998, 62]

Kampé de Fériet tournera son attention vers cette approche vers la moitié des années 1930, grâce aussi aux premières tentatives de Wehrlé et Dedebant d'appuyer

16. Sur le contexte allemand des mathématiques appliquées voir par exemple [Eckert 2007] et [Rowe 1989].

17. C'est le cas par exemple de Taylor et Wiener [Battimelli 1986] mais aussi de von Kármán et Richard Courant [Dahan Dalmedico 1996].

leur théorie sur le concept de dérivée aléatoire de Slutsky. De façon analogue à von Kármán, Taylor, Prandtl, Wehrlé, Dedebant et d'autres spécialistes de la mécanique des fluides proches au milieu américain autour de von Kármán, son objectif est de "façonner les mathématiques pour l'ingénierie". Cela en mettant en place des outils du calcul des probabilités qui donne une structure mathématique rigoureuse visant à généraliser la théorie statistique de Taylor-von Kármán, destinée à interpréter des faits expérimentaux.

Dans ce chapitre, nous verrons que ce mathématicien lillois représente un autre profil de spécialiste de mathématiques appliquées dans la France de l'entre-deux-guerres, qui se distingue de celui de Villat. Nous examinerons ces différences sur deux plans situés dans le contexte de la mathématisation de la mécanique des fluides de l'époque. En premier lieu, le plan des outils mathématiques : l'un utilise l'analyse, l'autre le calcul des probabilités. En deuxième lieu, le plan des objectifs de leur contribution théorique. D'après Kampé de Fériet, la priorité est d'inscrire les mathématiques dans la mécanique des fluides, en prenant en compte des fluides proches du cas réel, et dans la forte conviction que le calcul des probabilités puisse donner un important progrès dans l'interprétation des faits expérimentaux (*"Que ces probabilités sont utiles !"* [Kampé de Fériet 1945]). Il crée un modèle mathématique capable de donner une précise et rigoureuse interprétation probabiliste de la théorie de la turbulence alors que dans ses premiers travaux d'hydrodynamique sur la résistance d'un fluide, ce sont plutôt des résultats qui tendent vers la spéculation mathématique. C'est dans cet esprit qu'il donne des habits mathématiquement rigoureux aux concepts statistiques de la turbulence comme le spectre, la corrélation, la moyenne, l'hypothèse de fluide homogène, en démontrant par des théorèmes leurs propriétés.

Au contraire, la priorité de Villat est d'inscrire la mécanique des fluides dans le domaine des mathématiques sans prendre en compte des applications sur le plan expérimental. En effet, sa théorie sur la résistance d'un fluide parfait autour d'un obstacle s'appuie non pas sur une théorie provenant du domaine de l'ingénierie (comme la théorie de Taylor-von Kármán pour Kampé de Fériet) mais sur une théorie provenant du domaine des mathématiques, celle de Levi-Civita et des autres mathématiciens italiens. Robert d'Adhémar, à propos des *Aperçus théoriques sur la résistance des fluides* de Villat commente qu'"il faut être vraiment mathématicien pour lire M. Villat" et que "le Certificat des Mathématiques Générales ne suffirait pas, car il ne comporte pas la représentation conforme, le principe de Dirichlet, les fonctions elliptiques, dont M. Villat fait usage dès l'abord" [Adhémar 1922, 152]. De plus, les efforts de Villat étaient complètement focalisés sur la fondation d'une véritable école mathématique de la mécanique des fluides qui s'opposait à

celles de l'ingénieur Prandtl et du physicien Oseen à l'étranger (respectivement en Allemagne et en Suède), et qui divergeaient du souhaite du ministre de l'Air de renforcer la mécanique des fluides pratique au sein des divers instituts disséminé sur toute la nation :

> "J'aimerais bien que l'actuelle période d'inquiétude soit passée [avec le ministre de l'Air] et que l'école mathématicienne que j'aspire à faire naître pour rivaliser avec celle d'Oseen et de Prandtl ne soit transformée en école d'ingénieurs. Je compte beaucoup sur vous pour m'aider. Merci d'avance et tenez naturellement ma lettre comme confidentielle. Jusqu'à un certain point." [18].

Dans le but de marquer leurs différences, nous ferons ressortir le point de vue de Villat à travers les premiers travaux de Kampé de Fériet et de son étudiant turc, le mathématicien Ratip Berker. En d'autres termes, l'objet de ce chapitre est de montrer, à travers la trajectoire mathématique de Kampé de Fériet ces deux types de mathématisation de la mécanique des fluides pendant l'entre-deux-guerres : celui de 1929 à 1933 suivant la même approche que Villat, (première section) et celui de 1933 à 1946 qui se rapproche plus de von Kármán, en touchant parfois quelques aspects intéressants des années 1950 en relation avec la période de l'entre-deux-guerres (deuxième section). Là, nous mettrons aussi en évidence la manière dont son interprétation probabiliste de la théorie de la turbulence prend des formes différentes de celles de Wehrlé et Dedebant même s'il existe, au moins avant la fin de la seconde guerre mondiale, quelques points communs intéressants comme le fait que toutes les deux reposent sur le concept de dérivée aléatoire de Slutsky. Kampé de Fériet est très apprécié dans le milieu de von Kármán et par les probabilistes comme Paul Lévy et Maurice Fréchet alors que dans le milieu de Villat semble être moins intégré, ce qui nous incite à questionner sa place au sein de la communauté scientifique française. Nous verrons ce dernier aspect dans la dernière section. La question de l'appartenance au milieu de la mécanique des fluides française nous donne l'occasion de comprendre si ce milieu peut être identifié comme "communauté de mécanique des fluides", déjà au cours des années trente. Enfin, la correspondance d'une soixante-dizaine de lettres entre von Kármán et Kampé de Fériet (1933-1948), disponible dans le fonds von Kármán des Archives du California Institute of Technology (Caltech), ainsi que la correspondance avec Wiener contenue dans son fonds conservé aux Archives de l'Université de Harvard, nous permet de reconstruire sa vie scientifique en dehors de la France à travers les échanges scientifiques avec le milieu américain de la mécanique des fluides où il effectuera cinq séjours de deux ou trois mois chacun, jusqu'en 1951.

18. Villat à René Garnier, le 21 avril 1929. Texte reproduit chez [Fontanon 2017].

4.1 Une mécanique des fluides autour d'Henri Villat et des solutions exactes.

Les intentions de Villat à propos de son travail en mécanique des fluides se trouvent dans la préface de sa *Notice* [19] :

> "Le but essentiel des travaux que j'ai entrepris a été de réaliser des progrès marquants dans l'étude du problème capital que pose la Mécanique des fluides, c'est à dire dans l'étude de la résistance qu'un corps solide plongé dans un fluide éprouve à son avancement. La nature des choses m'a mis sur la voie d'un grand nombre de recherches de mathématiques qui se sont trouvé avoir mainte application ; rares sont celles de ces recherches qui n'aient pas eu pour cause initiale, et pour aboutissement, un perfectionnement désiré concernant le problème fondamental ci-dessous, ou quelque autre se rattachant à une partie quelconque de la Mécanique des fluides"

C'est dans cet esprit que Villat se propose d'édifier une théorie mathématique de la résistance d'un fluide avec une approche très différente que celles de Prandtl [20] et de Oseen [21] dans leurs théories pour la détermination d'un fluide visqueux autour un obstacle visant à dépasser le paradoxe de d'Alembert.

Au contraire de l'ingénieur allemand et du physicien suédois, il utilise les hypothèses des sillages pour réaliser une théorie des fluides parfaits qui soit rigoureuse du point de vue mathématique et qui puisse donner une bonne approximation de la théorie du fluide visqueux dans le cas limite où la viscosité tend vers zéro. A la page 13 de sa *Notice*, il écrit :

19. [Archives de l'Académie des Sciences, 61 J, Fonds Villat].

20. La théorie de la couche limite de Prandtl fut présentée pour la première fois en 1904 dans sa communication au Congrès International des Mathématiques à Herdelberg. Née en tant que concept mathématique loin des applications, à partir des années 1920 elle sera largement acceptée dehors de l'Allemagne pour comprendre le mouvement d'un fluide réel autour d'un obstacle. Sur l'émergence de cette théorie et son développement au sein de son école et à l'étranger voir [Eckert 2007]. Voir également ce livre pour la théorie des surfaces portantes de Prandtl.

21. Carl Oseen (1879-1944) fut un physicien théorique de l'Université de Uppsala et directeur de l'Institut Nobel de Physique Théorique à Stokholm. Sa théorie, entamée à partir du 1914, traite des problèmes à faible viscosité autour d'un obstacle à deux ou trois dimensions. L'idée est de donner une approximation satisfaisante de la structure du fluide autour de cet obstacle à partir de la distribution des tourbillons qui divise le fluide en deux régions : l'une tourbillonnaire derrière l'obstacle qui s'étend à l'infini et qui présente des tourbillons de longueur indépendante de x et de la forme $\zeta(y)$ (dans l'hypothèse d'un mouvement plan) ; l'autre irrationnelle définie par un potentiel $\Phi(x,y)$. Dans ce modèle, il définit le tourbillon en prolongeant $\Phi(x,y)$ dans la région tourbillonnaire, c'est à dire en superposant le fluide irrotationnel sur la région tourbillonaire. Un exposé de sa théorie se trouve dans les *Burgers'Papers* [Nieuwstadt et Steketee 2012–12–06].

> "Indiquons ici les recherches sur les *fluides visqueux*. La théorie des mouvements des fluides parfaits ne peut être envisagée que comme fournissant une image approchée de ce qui se passe dans les fluides réels. Les configurations des fluides parfaits, qui devront être considérées comme les plus essentielles, sont celles vers lesquelles on est conduit en considérant le mouvement d'un fluide visqueux, et examinant les cas limites réalisés en présence d'un corps solide, si la viscosité tend vers zéro"

La rivalité de Villat à l'égard de l'école allemande a très probablement influencé la diffusion de la théorie de Prandtl en France, laquelle est en conséquence moins mentionnée dans les publications françaises par rapports à d'autres résultats de l'ingénieur allemand comme par exemple la théorie des surfaces portantes pour les calculs pratiques des caractéristiques aérodynamiques d'un profil d'aile mince (portance, traînée, les moments aérodynamiques -roulis, tangage, lacet, pression etc.)[Anderson 1997, 257]. Réalisée pendant la première guerre mondiale mais publiée seulement en 1918 pour des raisons militaires, cette théorie fut divulguée en France surtout grâce au livre de Maurice Roy, [22] *Théorie des surfaces portantes : la théorie de Prandtl* (1922), et intégrée dans les cours de mécanique des fluides d'Henri Villat de l'École Nationale Supérieure (1938). Ainsi, si à l'étranger la plupart des spécialistes utilisaient les théories de la couche limite de Prandtl, en France "le paradigme dominant pour comprendre la résistance d'un fluide était la théorie des vagues" [Aubin 2006, 18].

En faisant un discours plus général, la thèse de Villat marquera le début de toute une série de thèses mathématiques en mécanique des fluides en France qui auront lieu pendant l'entre-deux-guerre : Marie-Louise-Dubreil Jacotin [23], Robert Mazet, Jean Leray, Maurice Roy, René Thiry, Henri Poncin, Julien Kravtchenko, Julien Demtchenko, Adalbert Oudart, en créant un milieu largement plus grand

22. Maurice Roy (1899-1985) fut un polytechnicien et ancien élève de l'École des mines. En 1923, il soutient sa thèse préparée sous la direction de Villat à l'Université de Strasbourg. A partir de 1924, il enseigna à la Sorbonne la théorie des ailes et des hélices et à l'École Supérieure d'Aéronautique de Paris de 1929 à 1939. Après la guerre, il jouera un rôle fondamental dans la fondation de l'ONERA où il sera nommé directeur général de 1949 à 1962.

23. Mme. Dubreil Jacotin (1905-1972) est une mathématicienne française, femme du mathématicien Paul Dubreil. Reçue deuxième à l'ENS, elle est rétrogradée à la position 21^{e}et donc non admise à l'École (juste les vingts premiers étaient admis) pour des raisons très probablement liées au fait qu'elle est une femme. Malgré cela, une bourse de licence lui permet de suivre les conférences de l'École et les cours de la Faculté des Sciences de Paris y compris le cours de Villat. Son séjour en Allemagne et sa rencontre avec Emmy Noether, furent déterminants pour ses recherches, qui tournèrent vers l'algèbre après sa thèse en mécanique des fluides. Elle sera titulaire d'une chaire de calcul différentiel et intégral à la Faculté des Sciences de Poitiers (1943) et en 1956 maitre de conférence à la Faculté des Sciences de Paris.

si on le compare à celui des autres professeurs de mécanique des fluides des universités de province [24]. Une partie de leurs thèses se rapportent à la théorie des sillages d'Henri Villat. Par exemple, René Thiry dans sa thèse soutenue en 1921 à l'Université de Strasbourg approfondit des résultats obtenus par Henri Villat en 1914 sur les singularités et les indéterminations trouvées parmi les solutions au problème du mouvement discontinu et uniforme à l'infini, d'un fluide parfait incompressible en présence d'un obstacle [Leloup 2009, 111] [25]. A Paris, Julien Kravtchenko soutient sa thèse en 1941 devant un jury de thèse composé par Villat, Bouligand et Pérès. Là, il reprend les recherches de Levi-Civita et Villat sur la représentation conforme de Helmholtz et la théorie des sillages et des proues, et qui s'inspirent de Jean Leray pour plusieurs résultats concernant les théorèmes d'existence et d'unicité pour des catégories de profil déterminé, plongé dans un fluide illimité. Dans sa thèse, *Sur la détermination des fonctions harmoniques par certaines conditions aux limites. Applications à l'hydrodynamique* (1935), Caïus Jacob introduit une nouvelle méthode en généralisant celle de Fredholm pour la résolution du problème de Dirichlet, en retrouvant par des voies plus simples quelques formules de Villat sur la théorie des sillages. Enfin, Henri Poncin étudie - en partant des recherches de Villat concernant les équations des fluides parfaits à deux dimensions - les problèmes liés aux mouvements d'un fluide pesant qui se produisent parallèlement à un plan vertical quand on connait les parois solides.

D'autres élèves de Villat s'inspiraient directement des recherches de Levi-Civita concernant la théorie des ondes et la théorie des jets. C'est le cas, respectivement, de Marie-Louise Dubreil-Jacotin et Robert Mazet, qui ont fait des séjours d'étude à Rome et ont échangé des lettres avec le mathématicien italien [26].Ces exemples mettent en évidence une véritable école mathématique de Villat, qui privilège les aspects mathématiques de la théorie au détriment de l'expérimentation, en s'appuyant sur l'idée que la consolidation des théorèmes et des propriétés puissent rendre la théorie-même "plus applicable" mais pas forcément en accord avec les données expérimentales [Tazzioli 2016, 283].

D'après ce qu'il déclare dans sa Notice, ses travaux semblent être développé même par ses collègues. C'est dans ce contexte qu'intervient Kampé de Fériet et ses premiers travaux d'hydrodynamique :

"L'importance d'une œuvre scientifique peut sans doute se mesu-

24. Villat a dirigé 17 thèses juqu'en 1943, dont 5 avant 1929 : voir [Fontanon 2017]. La plupart de ces thèses sont disponibles sur le lien Thèses de l'entre-deux-guerres.

25. A cette époque-là, Villat occupait la chaire de Mécanique à l'Université de Strasbourg.

26. Voir l'article [Tazzioli 2016] sur la manière dont les travaux de Levi-Civita attirèrent Robert Mazet et Marie-Louise Dubreil-Jacotin à Rome. Plus en général, cet article montre l'influence de Levi-Civita en France pendant les trente premières années du xx^{e} siècle.

> rer, au moins en partie, par son rayonnement. Puis-je noter que mes travaux, mes cours de recherches à l'Université de Strasbourg, et mes cours à la Sorbonne ont été l'occasion d'un nombre considérable de recherches, que je ne saurais énumérer sans risquer d'en oublier d'importantes. Je dois noter spécialement les essentiels travaux récents de MM. J. Pérès (Université de Marseille) ; G. Bouligand (Poitiers), J. Kampé de Fériet (Lille), T. Thiry (Strasbourg) sur la Mécanique des fluides" [27]

Dans cette section nous nous focaliserons sur Kampé de Fériet afin de faire ressortir cette façon d'approcher la mécanique des fluides qui est proche à celle de Villat. Ce type de recherche et d'approche seront poursuivi également par Ratip Berker, le seul étudiant mathématicien que Kampé de Fériet a eu pendant l'entre-deux-guerres. Même si sa thèse n'aborde pas des sujets couramment traités dans les thèses de mécanique des fluides soutenues à la même période à la Faculté des Sciences de Paris qui se rapportent davantage à la théorie des sillages [Leloup 2009, 111], elle peut être considérée comme une thèse mathématique de mécanique des fluides "à la française" à part entière. Après la soutenance de son doctorat, Berker quittera l'IMFL pour retourner en Turquie où le milieu mathématique est en plein développement grâce à la réorganisation de l'Université de Istanbul (1933) et l'émigration de plusieurs mathématiciens allemands comme Richard Von Mises (1883-1953) et William Prager (1903-1980) suite à l'arrivée au pouvoir de Hitler la même année [Eden et Irzik 2012]. A ce propos, nous consacrerons une partie de cette section à la thèse de Berker et à l'impact de son séjour en France dans le milieu mathématique turc. Kampé de Fériet et Berker sont les deux seuls mathématiciens de l'IMFL pendant l'entre-deux-guerres et c'est grâce à eux que cet institut peut se vanter d'avoir apporté une contribution au niveau international en ce qui concerne la mécanique des fluides mathématique.

4.1.1 Un développement "élégant" des recherches de Villat

Une application d'un théorème de Gaston Julia

Dans son premier travail d'hydrodynamique publié après la guerre [Kampé de Fériet 1929b], Kampé de Fériet poursuit les recherches de Villat sur le problème de la résistance d'un fluide, en particulier sur les conditions permettant d'avoir des valeurs non négatives de la pression dans un fluide parfait et indéfini (non limité par des parois) en mouvement plan, permanent et irrotationnel autour d'un obstacle de forme donnée, derrière lequel se place un sillage indéfini au repos.

27. Voir sa *Notice*, à la page 18.

Dans sa thèse [Villat 1911], Villat avait déterminé une transformation conforme qui faisait correspondre le domaine $\mathcal{A}$ du champ occupé par le fluide en mouvement par rapport au solide et le domaine $\mathcal{B}$ correspondant à l'aire intérieure d'un demi-cercle supérieur dans le plan d'une variable auxiliaire ζ et cela de façon que les bords du sillage -les lignes de jet- aient leur représentation sur le diamètre du demi-cercle situé sur l'axe réel [Figure 4.1]. La correspondance entre les points

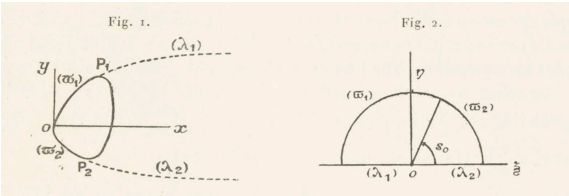


FIGURE 4.1 – Deux plans différents représentant la même configuration du fluide autour d'un obstacle. A gauche : le plan $z = x + iy$ $(\mathcal{A})$; à droite : le plan $\zeta = \xi + i\eta$ $(\mathcal{B})$ obtenu en appliquant sur le plan z une transformation conforme [Villat 1914, 233].

.

des plans $z = x + iy$ $(\mathcal{A})$ et $\zeta = \xi + i\eta$ $(\mathcal{B})$ est donnée par l'égalité :

$$z = \frac{a^2}{2} \int_{e^{i\sigma_0}}^{\zeta} e^{i\Theta(\zeta)} \left(\zeta + \frac{1}{\zeta} - 2\cos\sigma_0\right)\left(\zeta - \frac{1}{\zeta}\right)\frac{d\zeta}{\zeta}$$

En reprenant les résultats obtenus par Villat, la solution du problème de Kampé de Fériet concernant les conditions permettant d'avoir des valeurs non négatives de la pression dans un fluide, pouvait être ramenée à la recherche de la fonction $\Omega(\zeta)$ de variable complexe $\zeta = \xi + i\eta$ qui exprime tous les éléments cinématiques et géométriques du mouvement dans le plan où le fluide en mouvement est représenté sur le demi-cercle C contenu dans le demi-plan $\mathfrak{Im}(\zeta) > 0$ du domaine $\mathcal{B}$. Cette fonction, étudiée par l'école de Levi-Civita et vers laquelle Villat dirige son attention grâce à la correspondance avec Brillouin [Aubin 2006] et [Tazzioli 2016], s'obtient, pour un obstacle donné, par la formule fondamentale :

$$\Omega(\zeta) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} \frac{1 - \zeta^2}{1 - 2\zeta\cos\sigma + \zeta^2} \Phi(\sigma) d\sigma \tag{4.1}$$

Elle permet, par exemple, de déduire la vitesse V en un point du fluide et l'angle Θ entre la tangente à un point du profil de l'obstacle et la direction du courant à l'infini (axe Ox) :

$$V = e^{\Theta} \quad , \Theta = \mathfrak{Re}(\Omega)$$

La fonction $\Phi(\sigma)$ est la fonction arbitraire introduite par Villat dont dépend la

forme de l'obstacle et qui est choisie de façon qu'elle "exprime la relation $\Theta = \Phi(\sigma)$ entre l'inclinaison de la tangente à un point du profil de l'obstacle et l'angle σ du point correspondant dans la représentation conforme" ($\zeta = e^{i\sigma}$) [Villat 1911, 206]. Dans ce contexte, afin "d'assurer que le mouvement ainsi déterminé est physiquement acceptable", la pression p en un point du fluide non situé sur le sillage doit être non négative, ce qui se traduit, d'après la relation déduite par les équations d'Euler dans le fait qu'il faut vérifier que $V \leq 1$ en tout point du fluide :

$$p = p_0 + \frac{1}{2}(1 - V^2) \tag{4.2}$$

où p_0 est la pression à l'infini et dans le sillage en repos, qui est choisie arbitrairement. Ceci étant, Villat avait établi une série de conditions suffisantes sur Φ pour que la condition $V \leq 1$ soit vérifiée en tout point du fluide autour de l'obstacle [Villat 1914]. La nouveauté du travail de Kampé de Fériet [Kampé de Fériet 1929b], réside dans le fait qu'il se propose de déduire, de façon rigoureuse du point de vue mathématique, une condition nécessaire à partir d'une proposition empruntée à la théorie des fonctions de Gaston Julia et qui est contenue dans son article *Extension nouvelle d'un lemme de Schwartz* (1920). Kampé de Fériet reprend cette proposition de cette façon :

> "Soit $\omega(\epsilon)$ une fonction régulière dans le demi-plan $\mathfrak{Im}(\epsilon) > 0$ et telle que dans ce domaine $\mathfrak{Im}(\omega) \geq 0$; on suppose en outre qu'elle reste régulière au point $\epsilon = 0$ et que $\omega(0) = 0$. On peut affirmer alors : 1) que $\omega'(0)$ est réelle et positive ; 2) que l'on a dans tout le demi-plan :
>
> $$\mathfrak{Im}\left(\frac{1}{\omega(\epsilon)}\right) < \frac{1}{\omega'(0)}\mathfrak{Im}\left(\frac{1}{\epsilon}\right)"$$
>
> [Kampé de Fériet 1929b, 48]

Afin d'appliquer cette proposition à son problème, Kampé de Fériet introduit la transformation $\epsilon = \dfrac{\zeta}{1 + 2\zeta}$ qui donne une représentation conforme du demi-cercle C sur le nouveau semi-plan $\mathfrak{Im}(\epsilon) > 0$. En posant $\omega(\epsilon) = -\Omega(\zeta)$, cette fonction vérifie toutes les conditions du théorème grâce aussi aux propriétés de $\Omega(\zeta)$ que Villat avait établies plusieurs années avant et qui se trouvent résumées dans ses *Aperçus théoriques sur la résistance des fluides* (1922). D'après ces propriétés, $\Omega(\zeta)$ est régulière à l'intérieur du demi-cercle C : $|\zeta| < 1$, $\mathfrak{Im}(\zeta) > 0$ et sur le diamètre de C où $\mathfrak{Im}(\Omega) = 0$ (en particulier $\Omega(0) = 0$) ; enfin grâce aussi au fait qu'en un point $\zeta = e^{i\sigma}$ de C, $\mathfrak{Re}(\Omega) = \Phi(\sigma)$. En vertu de la première partie du théorème, il montre que si $V \leq 1$ en tout point du fluide, alors $\Omega'(0) < 0$, ce qui se traduit par

la condition nécessaire :

$$\int_0^{\pi} \Phi(\sigma)\cos(\sigma)d\sigma < 0 \tag{4.3}$$

Enfin, pour la deuxième partie du théorème, il déduit une égalité qui conduit à d'autres inégalités pour V et Θ.

A la suite de [Kampé de Fériet 1929b], Villat publie une note sous le titre *A propos du signe des pressions dans un fluide parfait* [Villat 1929b] visant à préciser les conditions analytiques de ce signe de pression et qui fait partie de l'ensemble des contributions à la théorie de la résistance des fluides. Plus précisément, il remarque que la condition nécessaire de Kampé de Fériet sur l'impossibilité d'avoir des pressions négatives ($\Omega'(0) < 0$) peut s'interpréter d'une autre façon, en prenant en compte une propriété concernant l'allure des lignes de jet (ou de glissement) λ_1 et λ_2, lignes qui sur le plan ζ figurent sur les bords de la demi-couronne appartenant à l'axe réel $O\xi$. D'après cette propriété, les deux lignes de jet doivent être toujours concaves vers le sillage au point à l'infini ($\zeta = 0$), ce qui permet une configuration de l'écoulement du fluide acceptable. Or, comme $\Omega(\zeta) = \Theta$ pour toutes les valeurs réelles ξ le long des lignes de jet, lorsque ζ traverse croissant la valeur 0 ($\Omega(0) = 0$), ζ passe du jet supérieur λ_1 au jet inférieur λ_2 qui sur le plan z équivaut à dire que $\Theta' < 0$ et Θ décroit, ce qui mène à l'inégalité de Kampé de Fériet $\Omega'(0) < 0$ et assure la concavité des lignes de jet à l'infini.

La condition nécessaire de Kampé de Fériet était déjà découverte par Marcel Brillouin en 1911, qui avait trouvé le même résultat sous une autre forme. D'après Villat, le mérite du mathématicien lillois est d'avoir obtenu cette condition "d'une façon très élégante" par l'application du théorème de Gaston Julia :

> "Il est d'un grand intérêt de l'avoir retrouvée directement par un procédé se rattachant, non pas à un raisonnement dont la traduction mécanique soit évidente, mais à un théorème de la théorie des fonctions" [Villat 1929b, 50]

Une reformulation rigoureuse de propositions déjà existantes

Comme l'observait en effet Villat dans [Villat 1929b], l'inégalité $\Omega'(0) < 0$ (et donc $V \leq 1$) assurait la concavité des lignes de jets au point à l'infini mais non pas la concavité en tout point des lignes où ζ est non nulle. Dans ce contexte, la note de Villat, suggère à Kampé de Fériet de reprendre sa "remarque élégante" et d'aboutir à une proposition plus générale : "si, en tout point du fluide en mouvement la vitesse V est inférieure à 1, les deux lignes de jet sont nécessairement concaves vers le sillage "[Kampé de Fériet 1929a, 230]. Il s'agit d'une proposition déjà

énoncée par Brillouin qui "s'était préoccupé surtout de l'interprétation physique du problème" [28]. Comme dans [Kampé de Fériet 1929b], le but de Kampé de Fériet et de fournir une formulation rigoureuse du point de vue mathématique à cette proposition, en lui donnant une démonstration à partir d'un théorème de l'analyse contenu dans le célèbre livre de deux mathématiciens hongrois George Pólya (1887-1985) et Gábor Szegő (1895-1985), *Aufgaben und Lehrsatze aus der Analysis* (1925) :

> "Soient un domaine D ayant pour frontière une courbe simple fermée F et $w = f(z)$ une fonction régulière à l'intérieur de D où l'on a $\mathfrak{Re}(w) > 0$, et continue sur un arc ab de F où l'on a $\mathfrak{Re}(w) = 0$; quand z décrit ab dans le sens positif, $\mathfrak{Im}(w)$ décroit constamment. [Kampé de Fériet 1929a, 231]"

Afin d'appliquer cette proposition, il pose $w = i\Omega(\zeta)$, laquelle est définie sur le demi-cercle C où l'on a sur son diamètre $\mathfrak{Re}(i\Omega) = 0$ et elle est régulière à l'intérieur du domaine D tel que $V \leq 1$ en tout point du fluide où l'on a $\mathfrak{Re}(i\Omega) = -\Theta > 0$. En choisissant comme segment ab C, un arc quelconque d'une des lignes de jet où l'on a constamment $V \leq 1$, il résulte du théorème que $\mathfrak{Im}(i\Omega) = \Theta$ décroit constamment si ζ parcourt ab dans le sens positif, ce qui implique que dans tout voisinage de cet arc la ligne est concave vers le sillage. En généralisant ce résultat à un point quelconque P d'une ligne de jet correspondant au point $\zeta = r$ $(-1 < r < 1)$ du diamètre de C, il conclut que s'il existe un voisinage de P où $V \leq 1$, il est nécessaire que la fonction de profil vérifie la condition :

$$\int_0^{\pi} \frac{\cos\sigma - 2r + r^2\cos\sigma}{(1 - 2r\cos\sigma + r^2)^2}\Phi(\sigma)d\sigma < 0$$

ce qui entraîne la concavité pour tous les points du fluide. De plus, en faisant $r = 0$ il retrouve la condition nécessaire obtenue dans [Kampé de Fériet 1929b]. Ces deux premières notes partagent pleinement l'approche de Villat et sont liées étroitement à ses travaux, en lui permettant de se rapprocher de plus en plus du milieu parisien de la mécanique des fluides. L'originalité de son travail ne réside pas dans la recherche de nouveaux résultats mais dans l'application de nouveaux théorèmes de l'analyse pour donner des habits élégants à des propositions qui existent déjà.

4.1.2 L'étude des solutions exactes dans les fluides visqueux

L'intégration des équations aux dérivées partielles du mouvement d'un fluide visqueux incompressible -mieux connues sous le nom d'équations de Navier-

28. Voir l'énoncé de Brillouin dans [Brillouin 1911, 157].

Stokes-, constitue un deuxième sujet auquel Kampé de Fériet s'attache dans le but de consolider ses principes mathématiques à l'aide de l'analyse. Cette thématique de recherche rencontrait et rencontre de grandes difficultés, si nous pensons que, encore aujourd'hui, la résolution mathématiquement rigoureuse des équations de Navier-Stokes constitue l'un des problèmes du prix du millénaire. Même dans le contexte le plus simple du mouvement plan et du fluide incompressible correspondant aux équations, ce problème pouvait être considéré comme "dépassant les possibilités de l'Analyse". Dans ce cas, les équations ont la forme suivante :

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{p}{\rho}+U\right) = \nu\Delta_2 u - \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u\frac{\partial u}{\partial x} + v\frac{\partial u}{\partial y}\right) \\ \frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{p}{\rho}+U\right) = \nu\Delta_2 v - \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u\frac{\partial v}{\partial x} + v\frac{\partial v}{\partial y}\right) \\ \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \end{cases} \tag{4.4}$$

où $p(x,y,y)$ la pression, $U(x,y,t)$ le potentiel des forces extérieures, ρ la densité, ν la viscosité cinématique et $u(x,y,t)$, $v(x,y,t)$ les composantes de la vitesse V [29].

Plusieurs mathématiciens et physiciens ont trouvé diverses méthodes d'intégration en fonction de la spécificité du problème envisagé. D'un côté, ils réalisèrent des méthodes qui consistaient à simplifier les équations à travers une linéarisation de ses termes pour la perturbation de la solution de Stokes, ce qui conduisait à une solution approchée. Dans cette voie, des résultats intéressants ont été obtenus par exemple, par l'école de Oseen dans le cas d'un écoulement à trois dimensions très lent à nombre de Reynolds faible (écoulement de Stokes). Là, le physicien suédois avait remplacé tous les termes inertiels non linéaires $u_j\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}\right)(i,j=1,2,3)$ par leurs approximations linéarisées $V\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_1}\right)$ où V est la vitesse uniforme loin de l'obstacle dans la direction x_1 .

De l'autre côté, ils se sont occupés de trouver des classes *de solutions exactes* des équations du mouvement du fluide visqueux incompressible. Dans cette section nous nous attarderons sur cette dernière direction. Dans ce contexte, Kampé de Fériet avait construit de nouvelles classes d'intégrales exactes à partir de l'équation du tourbillon et des ses propriétés. Ses résultats se trouvent dans une série de publications entre 1930 et 1933. Le choix de ce type de sujet, qui de manière générale consiste en la recherche des solutions exactes d'équations aux dérivées partielles à l'aide des théorèmes modernes de l'analyse, est encore proche des recherches et de l'approche de Villat. Quelques années plus tard, l'étudiant de Kampé de Fériet, Ratip Berker consacrera sa thèse *Sur quelques cas d'Intégration*

29. $\Delta_2 u$ est le laplacien de u : $\Delta_2 u = \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}$. La même chose pour v.

des équations du mouvement d'un fluide visqueux incompressible à ce sujet. Dans sa thèse, il donne une définition de solutions exactes des équations d'un fluide visqueux incompressible [Berker 1936, 2] :

> "Nous appellerons intégrale exacte des équations de Navier-Stokes une solution de ces équations telle que la détermination de son champ de vitesses se ramène à l'intégration d'un nombre fini d'équations appartenant à l'ensemble E constitué par les équations suivantes :
>
> 1. les équations différentielles ordinaires, linéaires ou non, mais algébriques ; celles qui sont effectivement rencontrées sont du quatrième ordre au plus ;
> 2. les équations aux dérivées partielles complètement linéaires du second ordre du type elliptique ou du type parabolique ; le nombre de variables indépendantes est en fait au plus trois "

L'histoire des méthodes mathématiques visant à retrouver les solutions exactes des équations du mouvement d'un fluide visqueux homogène et incompressible peut être reconstruite grâce à un article du mathématicien polonais Alfred Rosenblatt (1880-1947) [30], publié sur proposition de Villat dans le *Mémorial des Sciences Mathématiques* ([Rosenblatt 1935]). D'après l'article, les pionniers de ce type d'étude sont l'élève de Hilbert, Georg Hamel (1877-1954), et les "géomètres italiens" Cisotti, Crudeli et Caldonazzo, qui ont "élargi beaucoup le champ primitif des solutions exactes limité aux mouvements de Poiseuille, aux mouvements circulaires de Couette, et aux mouvements laminaires" [Rosenblatt 1935, 1]. Hamel trouva en 1916 une première classe importante de solutions exactes des équations du mouvement plan stationnaire d'un fluide visqueux, en supposant que la fonction de courant ψ est fonction d'une fonction ϕ harmonique sans que l'écoulement soit irrotationnel [31], il trouve que les solutions exactes de ces équations correspondent à des lignes de flux (ou de courant) qui sont des spirales logarithmiques avec leurs dégénérescences : circonférences ou droites. Quelques années plus tard, Crudeli, Caldonazzo et Cisotti introduisirent une nouvelle fonction de courant ψ dans l'espace pour construire d'autres solutions où les mouvements sont symétriques par rapport à un axe. Ces solutions correspondent aux mouvements radiaux de Crudeli, mouvements généraux symétriques par rapport à un axe de Cisotti, mouvements hélicoïdaux de Caldonazzo [Rosenblatt 1935, 34-45].

30. Professeur à Cracovie de 1908 à 1936, il quittera l'Europe la même année pour enseigner à l'Université de Lime où il donnera un nouveau élan aux mathématiques péruviennes.

31. Cette hypothèse s'exprime par le fait que ψ n'est pas harmonique même si les lignes de flux ϕ sont des courbes harmoniques. Rappelons-nous que si la fonction de courant est harmonique alors l'écoulement est potentiel et donc irrotationnel.

Ces pionniers donnèrent impulsion à un grand nombre de recherches au début des années 1930. Plusieurs noms sont mentionnés dans l'article : Oseen, Rosenblatt-même, Taylor, Berker, Kampé de Fériet, Millikan, Odovist, Olsson, Faxen, Szymanski, Witoszynski, Villat et d'autres. Oseen, par exemple, étudie les solutions exactes dans le cas de mouvements stationnaires dans l'espace qui n'ont pas en général de symétrie axiale et généralise les résultats de Hamel sur le mouvement plan en ajoutant de nouvelles conditions à sa fonction de courant. C'est dans ce contexte, qu'il trouve une forme des lignes de courant très compliquée à tel point qu'on leur peut associer un mouvement "qu'il n'est pas exagéré d'appeler turbulent" [Rosenblatt 1935, 31]. Le même auteur de l'article, Rosenblatt, obtient certaines classes de solutions concernant les mouvements voisins des mouvements envisagés précédemment, en se penchant sur l'étude de la stabilité des solutions, problème encore peu exploré en ce qui concerne le cas d'un fluide visqueux [Rosenblatt 1935, 45-60]. Dans les *Leçons d'hydrodynamique* [Villat 1929a] et, surtout plus tard, dans le deuxième livre des *Leçons sur les fluides visqueux* [Villat 1943], Villat présente un exposé critique sur les solutions exactes des équations du fluide visqueux, en lui ajoutant des remarques mathématiques très élégantes [32]. Dans ce contexte, quelle est la contribution de Kampé de Fériet et Berker ?

Les nouvelles classes d'intégrales exactes de Kampé de Fériet

Le premier travail de Kampé de Fériet sur les solutions exactes fut présenté à l'ICAM de Stokholm en 1930 et publié dans les *Annales de la Société Scientifique de Bruxelles* la même année [Kampé de Fériet 1930]. Dans cet article, il considère l'équation du mouvement plan d'un fluide visqueux incompressible 4.4 et le tourbillon normal au plan :

$$\zeta = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}\right)$$

qui vérifie l'équation qui s'obtient en éliminant la fonction $\frac{p}{\rho}+U$ entre les premières deux équations de 4.4 :

$$\nu\Delta_2\zeta - \left(\frac{\partial \zeta}{\partial t} + u\frac{\partial \zeta}{\partial x} + v\frac{\partial \zeta}{\partial y}\right) = 0 \tag{4.5}$$

32. Le deuxième livre des Leçons de 1943 est entièrement consacré à cette question et il est intitulé *Des solutions exactes des équations de Navier*. Dans ce livre, Villat expose la théorie d'Hamel, de Oseen et Rosenblatt et il montre comment l'analyse permet de donner des solutions rigoureuses au moyen de la fonction de Bessel, le problème de Sturm-Liouville etc.

Ensuite, il introduit la fonction de courant $\psi(x,y,t)$ tel que u et v peuvent s'écrire comme :

$$u = \frac{\partial \psi}{\partial y}, \ , \ v = -\frac{\partial \psi}{\partial x}$$

Sous ces conditions, l'intégration de 4.4 est ramenée à l'intégration du nouveau système à deux fonctions inconnues ψ et ζ :

$$\begin{cases} \nu \Delta_2 \zeta = \frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial \psi}{\partial y} \cdot \frac{\partial \zeta}{\partial x} - \frac{\partial \psi}{\partial x} \cdot \frac{\partial \zeta}{\partial y} \\ \Delta_2 \psi = -2\zeta \end{cases}$$

Dans ce système, les termes non linéaires sont les quantités exprimant les effets inertiels :

$$\frac{\partial \psi}{\partial y} \cdot \frac{\partial \zeta}{\partial x} - \frac{\partial \psi}{\partial x} \cdot \frac{\partial \zeta}{\partial y} = \frac{D(\zeta, \psi)}{D(x,y)} \tag{4.6}$$

En général, les spécialistes de la mécanique des fluides avaient essayé d'intégrer ces équations en donnant une valeurs approchée à $\frac{D(\zeta,\psi)}{D(x,y)}$ ou en négligeant ces termes sous l'hypothèse d'un écoulement très lent où les forces visqueuses dominent les effets inertiels. Là, Kampé de Fériet se place dans une autre voie, sans recourir aux équations approchées et tout en restant sur les solutions exactes. En supposant que le mouvement est stationnaire ($\frac{\partial \zeta}{\partial t} = 0$), il trouve tous et les seuls cas où les termes 4.6 sont nulles. En d'autres termes, il montre que "la condition nécessaire et suffisante pour que ces termes disparaissent de l'équation déterminant le tourbillon, c'est que le tourbillon soit constant tout le long de chaque ligne de courant ; dans ce cas on peut aisément intégrer les équations du mouvement permanent." [Kampé de Fériet 1930, 78]

Ainsi, en supposant que ζ est constant le long de chaque ligne de courant de ψ, le système à intégrer devient :

$$\begin{cases} \Delta_2 \zeta = 0 \\ \Delta_2 \psi = -2\zeta \end{cases}$$

Comme ζ est supposé être la partie réelle d'une fonction $F(z)$ de variable complexe $(x+iy)$, il trouve que cette fonction doit vérifier l'équation

$$\Delta_1 \zeta = g(\zeta) = a^2 e^{k\zeta}$$

en plus que $\Delta_2 \zeta = 0$. L'intégration du système 4.1.2 conduit à trois solutions différentes, c'est-à-dire à trois types de mouvement selon la forme que prend $g(\zeta)$ en fonction des valeurs des constantes a et k :

1. si $a = 0$ (ζ constant dans tout le fluide), $\Delta_2\psi = K$ et les composantes de la vitesse $u(x,y)$ et $v(x,t)$ sont des fonctions harmoniques.
2. si $a \neq 0$, $k = 0$ les lignes de courants sont parallèles à l'axe oy et le mouvement est laminaire
3. si $a \neq 0$, $k \neq 0$ le mouvement est par cercles concentriques

En résumé, Kampé de Fériet obtient trois classes de solutions exactes entièrement déterminées par la condition $\frac{D(\zeta,\psi)}{D(x,y)} = 0$, ce qui équivaut à dire que le tourbillon est constant le long de chaque ligne de courant. Les mouvements qui appartiennent à ces classes ne sont pas des mouvements nouveaux ; il s'agit de mouvements classiques très simples qui étaient déjà découverts déjà avant les recherches de Hamel. Comme pour ses notes concernant la résistance d'un fluide parfait, l'importance de cette publication ne réside pas dans la nouveauté des résultats mais dans la façon de démontrer de façon élégante et rigoureuse que les trois classes de mouvements, déjà connus, sont les seuls mouvements stationnaires qui résultent de l'hypothèse faite et qui conviennent à la fois aux fluides visqueux et aux fluides parfaits car la solution (ζ,ψ) vérifie en même temps le système D et le système analogue pour les fluides parfait en posant $\nu = 0$.

Juste quelques années après, il poursuit ce type de recherches qui aboutissent à un deuxième article *Sur une classe de mouvements plans d'un fluide visqueux incompressible*[Kampé de Fériet 1931]. Là, il donne une méthode pour trouver une nouvelle classe de solutions beaucoup plus étendue que celles trouvées dans [Kampé de Fériet 1930] et qui se base sur la construction du champ de la vitesse par composition à partir de deux champs plus simples et fondamentaux, l'un d'un mouvement irrotationnel, l'autre d'un mouvement rotationnel où les trajectoires sont des circonférences concentriques. En effet, comme l'équation 4.5 n'est pas linéaires, si u_1, v_1 et u_2, v_2 sont deux solutions de 4.5, cela n'implique pas nécessairement que le champ obtenu en les composant est encore une solution de cette équation. Kampé de Fériet se propose de trouver une solution à ce problème, en créant une nouvelle méthode de composition qui puisse finalement aboutir à ce résultat. Plus précisément, en rapportant le mouvement du fluide à un système de coordonnées polaires (r,θ) et désignant par v_r, v_θ et $\zeta(r,\theta,t)$, respectivement, les composantes de la vitesse relatives au nouveau système, les équations du mouvement plan d'un fluide visqueux incompressibles deviennent :

$$-\frac{\partial H}{\partial r} = \frac{\partial v_r}{\partial t} - 2\zeta_{v_\theta} + \frac{\nu}{r}\frac{\partial \zeta}{\partial \theta} \tag{4.7}$$

$$-\frac{1}{r}\frac{\partial H}{\partial \theta} = \frac{\partial v_\theta}{\partial t} + 2\zeta_{v_r} - 2\nu\frac{\partial \zeta}{\partial r} \tag{4.8}$$

$$\frac{\partial(rv_r)}{\partial r} + \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} = 0 \tag{4.9}$$

Dans un tel mouvement, il considère un champ de vitesse obtenu par composition d'un champ d'un mouvement irrotationnel défini par un potentiel $\phi(r,\theta,t)$, et d'un champ d'un mouvement rotationnel dont les composantes de la vitesse sont 0 et $w(r,t)$. Les composantes du champ de la vitesse résultante sont alors $v_r = \dfrac{\partial \phi}{\partial r}$ et $v_\theta = \frac{1}{r}\dfrac{\partial \phi}{\partial \theta} + W$. En reportant ces deux valeurs dans les équations 4.7, 4.8, 4.9 et en appliquant les règles simples de dérivation de l'analyse, il arrive d'abord à écrire les deux composantes du nouveau champ de la vitesse sous la forme $v_r = \frac{a(t)}{r}$ et $v_\theta = \frac{b(t)}{r} + W(r,t)$ à l'aide des fonctions arbitraires $a(t), b(t)$, et ensuite à démontrer que la "condition nécessaire et suffisante pour que le champ de vitesses

$$v_r = \frac{a(t)}{r},\ v_\theta = \frac{b(t)}{r} + W(r,t)$$

définisse le mouvement plan d'un fluide visqueux incompressible, c'est que la fonction $W(r,t)$ vérifie l'équation aux dérivées partielles du type parabolique

$$\frac{\partial W}{\partial t} + \frac{a(t) - \nu}{r}\frac{\partial W}{\partial r} - \nu \frac{\partial^2 W}{\partial r^2} = \frac{k(t) + b'(t)}{r}, \tag{4.10}$$

la fonction $k(t)$ étant arbitraire [Kampé de Fériet 1931, 10]." Ainsi, cette proposition lui permet de créer une nouvelle classe de solutions exactes grâce aux fonctions arbitraires $a(t), b(t), k(t)$, et surtout grâce au fait que la fonction W "n'est assujettie qu'à vérifier l'équation aux dérivées partielles 4.10 qui peut s'intégrer sous des formes très variées." Par exemple, en posant $a'(t) = b'(t) = k(t) = 0$ il obtient le même mouvement à spirale logarithmique qu'avait obtenu Hamel en 1916.

La dernière note de Kampé de Fériet sur les solutions exactes d'un fluide visqueux remonte à 1933, après avoir publié, en 1932, un résultat qui généralisait la condition d'annulation des termes non-linéaires de [Kampé de Fériet 1930] au cas du fluide visqueux incompressible non stationnaire [Kampé de Fériet 1932]. Ce dernier travail [Kampé de Fériet 1933] n'est qu'une application du théorème de Green aux mouvements "réguliers" dans un domaine, à savoir des mouvements dont le tourbillon ζ et la fonction courant ψ sont deux fonctions continues et dérivables jusqu'au second ordre. En désignant par S un domaine plan tel que le mouvement du fluide à l'intérieur est régulier et dont la frontière C est composée d'un nombre fini des courbes fermées régulières d'éléments d'arc ds, il tire de la

formule de Green les deux relations suivantes :

$$\int_s f\Delta_2 g d\sigma + \int_s \Delta_1(f,g)d\sigma = \int_c f \cdot \frac{\partial g}{n} ds \tag{4.11}$$

$$\int_s F(g)\frac{D(f,g)}{D(x,y)}d\sigma = \int_c fF(g)dg \tag{4.12}$$

En posant $f = \psi$ et $g = \zeta$ il obtient quelques propriétés qualitatives concernant l'existence des lignes isotourbillon fermées tandis que $f = \zeta$ et $g = \psi$ le conduit à déduire d'autres propriétés sur l'existence des lignes de courant fermées.

Ce travail marquera non seulement la fin des travaux sur les solutions exactes de la mécanique des fluides mais aussi la fin de ce type d'approche "à la française" et un rapprochement envers les solutions aléatoires et la théorie de la turbulence anglo-américaine. Cependant, ces recherches seront poursuivies jusqu'en 1936 par Ratip Berker.

Ratip Berker. Un autre mathématicien à l'IMFL

Ratip Berker soutient sa thèse le 21 avril 1936 à la Faculté des Sciences de Lille devant une commission d'examen composée par Kampé de Fériet (président), le directeur de l'Observatoire de Lille Charles Gallisot et Robert Mazet, directeur du laboratoire de mécanique expérimentale de Lille depuis 1931.

Dans son travail, il se propose de définir une transformation permettant de tirer de toute solution exacte des équations de Navier-Stokes déjà connue (les solutions classiques, celles de Hamel, Oseen, Cisotti, Crudeli, Caldonazzo etc.) une nouvelle solution exacte. Dans le but de construire sa transformation, il considère un mouvement dans l'espace d'un fluide visqueux incompressible où les composantes de la vitesse par rapport aux axes fixes Ox, Oy, Oz sont :

$$u^I(x,y,z,t),\ v^I(x,y,z,t),\ w^I(x,y,z,t) \tag{4.13}$$

Son idée est de créer une transformation qui, appliquée à ce mouvement $V^I(u^I, v^I, w^I)$ fait correspondre un nouveau mouvement $V^{II}(u^{II}, v^{II}, w^{II})$ d'un deuxième système mobile d'axes O_1X, O_1Y, O_1Z tel que ce dernier mouvement soit encore celui d'un fluide visqueux incompressible, c'est-à-dire qu'il satisfasse encore à l'équation de Navier-Stokes. A ce propos, il démontre que les nouvelles solutions exactes seront

définies par les relations suivantes :

$$u^{II(x,y,z,t)} = a' + Q_0(z-c) - R_0(y-b) + u_I(X,Y,Z,t)\alpha_1 + v_I(X,Y,Z,t)\alpha_2 + w_I(X,Y,Z,t)\alpha_3$$
$$v^{II(x,y,z,t)} = b' + R_0(x-a) - P_0(z-c) + u_I(X,Y,Z,t)\beta_1 + v_I(X,Y,Z,t)\beta_2 + w_I(X,Y,Z,t)\beta_3$$
$$w^{II(x,y,z,t)} = c' + P_0(y-b) - Q_0(x-a) + u_I(X,Y,Z,t)\gamma_1 + v_I(X,Y,Z,t)\gamma_2 + w_I(X,Y,Z,t)\gamma_3$$

si u^I, v^I, w^I vérifient les équations :

$$P\frac{\partial u^I}{\partial x} + Q\frac{\partial u^I}{\partial y} + R\frac{\partial u^I}{\partial z} = P'$$
$$P\frac{\partial v^I}{\partial x} + Q\frac{\partial v^I}{\partial y} + R\frac{\partial v^I}{\partial z} = Q'$$
$$P\frac{\partial w^I}{\partial x} + Q\frac{\partial w^I}{\partial y} + R\frac{\partial w^I}{\partial z} = R'$$

où a, b, c, P, Q, R sont six fonctions arbitraires tel que a, b, c sont les coordonnées de l'origine O_1 du système mobile par rapport à celui fixe ; P, Q, R sont les composantes des vecteurs unitaires $\overrightarrow{O_1X}$, $\overrightarrow{O_1Y}$, $\overrightarrow{O_1Z}$. Grâce à cette transformation, Berker obtient rigoureusement un large nombre de nouvelles intégrales exactes dans le cas de mouvements permanents et non permanent qui peuvent être soit plans, soit spatiaux ou de révolution. Ses travaux, poursuivis par son maître Kampé de Fériet, acquièrent progressivement une notoriété internationale pas seulement grâce à ses communications aux ICAM mais aussi parce qu'il trouve, une fois rentré à Istanbul, un milieu mathématique favorable qui lui donne l'opportunité de s'épanouir à la fois du point de vue scientifique et institutionnel. En Turquie, il poursuivra ce type de recherche avec la même rigueur mathématique, en travaillant sur les solution exactes des équations de la couche limite le long d'une plaque plane, sur l'énergie cinétique d'un fluide visqueux incompressible, sur les propriétés du rotationnel d'un champ vectoriel qui est né sur la frontière de son domaine de définition etc.

Quant au milieu mathématique turc, son développement devient progressivement plus accentué à partir des années 1930. En effet, une reforme de l'éducation du 1933 avait modernisé le système de l'éducation et de la formation scientifique turque, qui fut réorganisé comme "Université de Istanbul". 1933 c'était aussi la même année où Hitler prenait le pouvoir de l'Allemagne et, de façon analogue aux États-Unis et au Royaume-Unis, plusieurs scientifiques émigrés arrivèrent en Turquie entre 1933 et 1945, en influençant profondément l'enseignement et la recherche turque de cette période. Ces influences ne provenaient pas seulement des allemands mais aussi par d'autres scientifiques étrangers qui venaient enseigner, notamment anglais, français, hongrois et suisse. Parmi ces scientifiques, il

y avait aussi des mathématiciens comme Richard Von Mises, Hilda Geiringer et William Prager qui changèrent les pratiques de l'enseignement et de la recherche de l'Institut de Mathématiques de Istanbul, en prenant comme exemple le modèle de Gottingen et en renforçant en particulier les mathématiques appliquées [33]. Outre à accueillir des mathématiciens étrangers, l'institut des mathématiques, sous le soutien du gouvernement turc, dispensait des bourses aux étudiants afin qu'ils puissent effectuer des séjours d'études à l'étranger ou un doctorat. C'est dans ce contexte que Ratip Berker eut la possibilité d'effectuer des études en France, d'abord à l'Institut électrotechnique de Nancy et ensuite à l'IMFL. Après son doctorat, il devient professeur à l'Institut des mathématiques. La commission pour le nommer comprenait Prager et Von Mises qui ont bien aimé son travail sur les solutions exactes des équations de Navier-Stokes [Eden et Irzik 2012, 439].

Comme d'autres jeunes turcs qui avaient effectué des études à l'étranger, notamment Cahit Arf à l'École Normale Supérieure et Ferruh Şemin à l'université de Grenoble, Ratip Berker fit partie d'une nouvelle génération de mathématiciens qui exploitent son expérience en dehors de leur pays pour jouer un rôle intermédiaire entre les milieux mathématiques étrangers et turc. Par exemple, c'est grâce à eux, que les cours de Prager et Von Mises pouvaient être traduits et mis à disposition des élèves. Et c'est dans ce contexte "de renouvellement de la communauté mathématique turque" que Berker acquiert une position institutionnelle toujours plus renommée, surtout après la seconde guerre mondiale. A partir de 1944, Berker débutera son enseignement à l'Université Technique de Istanbul (IUT) où il sera nommé Doyen de la Faculté d'Ingénierie Mécanique de 1944 à 1948. Cependant, une réforme de 1946 empêchait les professeurs de travailler dans une deuxième université, ce qui obligera Berker à quitter son poste à l'Institut de Mathématiques à l'université de Istanbul. A l'IUT, il se consacrera complètement à la formation des ingénieurs juqu'aux années 1960, en essayant d'orienter l'université technique vers les mathématiques et les mécaniques appliquées. Son rôle d'intermédiaire entre l'étranger et la Turquie se manifeste également dans son exposé sur les solutions exactes qui apparaîtra en 1963 dans la bien connue Encyclopédie des Physiques allemandes l' *Handbook der Physics* [34]. De plus, il effectuera divers séjours aux États-Unis (Université d'Indiana) et en France, où il passera 10 ans de sa carrière de 1962 à 1972 (5 ans à Paris et 5 ans à Lille), après quoi il sera nommé professeur à l'université du Bosphore jusqu'à sa retraite en 1979 [35]. Enfin,

33. Sur l'influence de Von Mises, Prager, Geiringer sur le développement des mathématiques turques voir par exemple [Eden et Irzik 2012].

34. Plus précisément, il s'agit du volume 3/8-2 de mécanique des fluides.

35. Émigration en France pour des raisons politiques ? En tout cas, il s'agit d'une donnée à vérifier car nous n'avons trouvé aucune trace sur ce long séjour en France. Pour cette information, nous nous sommes appuyés sur sa biographie rédigée par le TÜBİTAK, une organisation nationale

sa position institutionnelle est bien visible dans le milieu de l'édition scientifique où il est membre et président du comité de lecture de trois revues scientifiques : *Bulletin of the Technical University of İstanbul*, *Archive for Rational Mechanics and Analysis* et *International Journal of Engineering Science*.

Nous avons vu, à travers l'exemple de sa thèse, comment ce mathématicien hérite des recherches et de l'approche à la française des premières années de Kampé de Fériet en tant que directeur de l'IMFL, en réalisant un travail de mécanique des fluides théorique qui met l'accent sur les applications des théories modernes de l'analyse dans ce domaine. Il serait intéressant de comprendre comment cette approche "à la française" de Berker influence ou non le milieu mathématique turc...

4.2 L'approche probabiliste à la mécanique des fluides autour de von Kármán

Pendant l'entre-deux-guerres, l'analyse statistique des fluides turbulents de Taylor et von Kármán, la longueur de mélange de Prandtl, et les analogies avec le mouvement brownien de Wiener ouvrent la voie à deux approches au problème de la turbulence développée : l'approche statistique déterministe et l'approche statistique probabiliste. Dans l'approche déterministe, l'étude de la turbulence se fonde sur l'étude des propriétés statistiques (fonction de corrélation, spectre, etc.) d'un seul champ de vitesse, d'une seule trajectoire. C'est le même traitement statistique que nous avons rencontré chez Taylor et von Kármán. En revanche, l'approche probabiliste envisage l'analyse statistique d'un ensemble de champs possibles de vitesses. En d'autres termes, elle étudie l'évolution du mouvement d'une seule particule choisie au hasard dans un ensemble probabilisé de tous ses mouvements possibles, dont même les conditions initiales sont aléatoires [36].

Née afin de dépasser le problème de la fermeture des équations de Reynolds, l'approche probabiliste trouve ses origines dans la mécanique statistique de Gibbs et elle est standard dans la physique statistique [37]. Cependant, la difficulté d'ap-

turque qui existe encore aujourd'hui et qui a pour but de promouvoir et coordonner la recherche scientifique turque. Berker en fut président de 1979 à 1982.

36. Pour une comparaison de ces deux approches, voir l'article de Marie Farge et Étienne Guyon [Farge et Guyon 1999].

37. Comme Marie Farge le remarque, "la correspondance entre la mécanique statistique et la mécanique des fluides est d'ordre purement mathématique et indépendante du fait que les fluides sont décrits à l'échelle microscopique par la mécanique statistique : la théorie statistique de la turbulence est distincte de la mécanique statistique des fluides". [Farge 1992, 226].

pliquer cette mécanique à la turbulence dérive du fait que les systèmes turbulents sont des systèmes thermodynamiques ouverts parce que des forces extérieures agissent sur eux à grandes échelles (forces extérieures qui fournissent de l'énergie cinétique) et à petites échelles (forces de frottement visqueux qui dissipent cette énergie cinétique) [Farge 1992, 226].

Une telle approche fut adoptée vers 1935 par un étudiant de Prandtl, Hans Gebelein, et au cours des années suivantes par l'école russe de Kolmogorov (1939-1941), Onsager aux États-Unis, et von Weizsäcker et Heisenberg en Allemagne. En 1941, Kolmogorov publie sa célèbre théorie de la turbulence, la théorie K41, où il reprend les idées de Richardson pour étudier comment l'équation de Navier-Stokes répartit l'énergie entre les différentes échelles d'un écoulement turbulent développé, en retrouvant les résultats de la théorie statistique de Taylor-von Kármán dans un ensemble d'échelles intermédiaires, la zone inertielle, où il suppose que l'énergie est transférée de façon conservative entre les diverses échelles et l'écoulement se comporte comme un système thermodynamique isolé. Là, il traite les composantes de la vitesse comme des variables aléatoires pour étudier le fluide supposé homogène et turbulent. Von Weizsäcker et Heisenberg, prisonniers de guerre à Cambridge, retrouvèrent indépendamment les mêmes résultats en 1945 [38].

En France, Kampé de Fériet embrasse ce type d'approche. Sa contribution se propose de construire un modèle mathématique rigoureux fondé sur les fonctions aléatoires stationnaires de Kolmogorov, Khintchine et Slutsky et susceptible de décrire le problème de la turbulence linéaire homogène, plus précisément les fluctuations de la vitesse d'un fluide turbulent. Le nom de Gibbs apparaîtra explicitement dans ses travaux à partir des années 1950 lorsqu'il comprend l'importance de remplacer les concepts de moyenne temporelle et spatiale avec celui de moyenne d'ensemble emprunté à la mécanique statistique des systèmes à un nombre fini de degrés de liberté. D'après lui, la moyenne doit être non plus calculée le long d'un écoulement donné mais sur l'ensemble des états possibles du système décrivant le fluide. C'est à partir de ce moment-là qu'il focalisera ses efforts pour utiliser le langage de la théorie des fonctions aléatoires pour étendre le point de vue de Gibbs à la mécanique des fluides.

Mais si d'un côté on assiste à une sorte de probabilisation de la théorie de la turbulence, en même temps, la théorie du calcul des probabilités se perfectionne grâce à ses applications à la mécanique des fluides. C'est le cas, par exemple, de

38. Sur Kolmogorov, Onsager, von Weisacker et Heisenmberg voir [Battimelli et Vulpiani 1982] et [Farge 1992]. Sur Gebelein voir [Bass 1946].

Wiener qui, inspiré des travaux de Taylor, va construire une mesure de probabilité mathématiquement acceptable sur l'ensemble des trajectoires possibles d'une particule en mouvement brownien. Au delà de Wiener, nous aurons l'occasion de rencontrer, au cours de ce chapitre, d'autres exemples : Kolmogorov et les applications à la mécanique des fluides de ses élèves ; Wehrlé et Dedebant et leur théorie des fonctions aléatoires en liaison avec la météorologie ; et Paul Lévy dont la critique à la dérivée aléatoire de Slutsky le motive à une investigation plus profonde du concept de la moyenne quadratique au sein de sa théorie des processus stochastiques. Dans ce contexte, Kampé de Fériet aussi, stimulé par ses applications de la théorie des fonctions aléatoires et l'analyse harmonique, travaillera sur la représentation des fonctions aléatoires, sur les différentes mesures d'espaces de Banach, de Hilbert-séparable, sur les propriétés des intégrales aléatoires etc.

Le livre de Robert Fortet [39] et André Blanc-Lapierre [40] consacré à la théorie des fonctions aléatoires, *Fonctions aléatoires et théorie statistique de la turbulence* [Blanc-Lapierre et Fortet 1953], destiné pas seulement aux théoriciens mais encore aux utilisateurs et aux physiciens, illustre parfaitement cette simultanée et réciproque influence entre les progrès du Calcul des Probabilités et la mécanique des fluides et qui implique, bien-sûr, d'autres domaines de la physique et de l'ingénierie. Dans cette illustration, ils donnent également une définition de fonction aléatoire [41] en tant que fonction de l'Analyse auquel on ajoute un comportement aléatoire :

> Dans une certaine mesure, on peut dire que la notion de fonction aléatoire a été, en quelque sorte, imposée par l'expérience ; la considération des phénomènes météorologiques, l'étude de la turbulence des fluides, puis celle des phénomènes de fluctuations en électricité connu sous le bruit de fond, etc., ont amené de façon inévitable à considérer

39. Robert Fortet (1912-1998) fut mathématicien élève de Fréchet. Sa thèse, soutenue en 1939, porte sur les processus markoviens dans le cas de chaînes dénombrables (à nombre infini d'états) définies dans des espaces de Banach. Après sa thèse, il enseignera d'abord à Caen et ensuite à Paris, notamment à la Faculté des Sciences et à l'École supérieure de Physique et de Chimie Industrielles de la Ville de Paris (ESPCI). Directeur du laboratoire de probabilités de Paris-Jussieu (LPMA), il jouera un rôle fondamental dans la promotion du calcul des probabilités et ses applications.

40. André Blanc-Lapierre (1915-2001) fut un mathématicien élève de Fortet. Comme dans sa thèse, *Sur certaines fonctions aléatoires stationnaires et applications à l'étude des fluctuations dues à la structure électronique de l'électricité*(1945) ses recherches contribueront à introduire en physique les fonctions aléatoires. Il sera professeur à Alger (1950-1961) et directeur de l'École Supérieure de l'électricité (SupElec).

41. La notion de fonction aléatoire ne doit pas être confondue avec celle de processus stochastique. Dans le cas de processus stochastiques, la construction de la fonction aléatoire est progressive : si nous la connaissons en un temps t, nous pouvons la déterminer dans le temps Δt et ainsi de suite. En revanche, la fonction aléatoire est connue dans son entière intervalle de définition et non pas étape par étape.

> des êtres qui révèlent de la notion de fonction telle qu'elle apparaît en Analyse, mais qui possèdent, en plus, un caractère aléatoire ; ces êtres sont précisément les fonctions aléatoires. Une fonction aléatoire X d'un paramètre t définie sur une certaines catégories d'épreuves se présente, sur chaque épreuve $\mathcal{E}$, comme une fonction au sens de l'Analyse, mais cette fonction peut être différente d'une épreuve à une autre, et c'est par ce canal que s'introduit le caractère aléatoire. Si on fixe la valeur du paramètre t, alors X ne dépend pas plus que de l'épreuve $\mathcal{E}$: c'est une variable aléatoire au sens du Calcul des Probabilités. Cette double dépendance de X, par rapport au paramètre t et par rapport à l'épreuve peut être rappelé par la notation suggestive que nous utiliserons souvent : $X = X(t, \mathcal{E})$. Les utilisateurs (spécialistes de météorologie, d'hydrodynamique, de radioélectricité, etc.) sont plutôt partis de l'idée de fonction à laquelle ils ont, en quelque sorte, ajouté de l'aléatoire. [....]
>
> Un cheminement intellectuel inverse a été effectué par des spécialistes du Calcul des Probabilités, qui sont partis de la notion de variable aléatoire et ont cherché à l'étendre en lui substituant celle, très générale, d'élément aléatoire de nature quelconque. Naturellement, parmi les éléments aléatoires de nature quelconque, on rencontre les fonctions aléatoires. [Blanc-Lapierre et Fortet 1953, 1]

Ainsi, ces échanges réciproques contribuent à marquer l'histoire du calcul des probabilités aussi. A cette époque-là, ce domaine était en plein développement mais encore "en construction" en tant que discipline mathématique autonome. La fondation théorique de la théorie moderne du calcul des probabilité à partir de la théorie de la mesure de Borel et l'intégrale de Lebesgue étaient encore en cours [42].

42. La période 1925-1940 est marquée par les importants progrès donnés par les travaux de Khintchine, Slutsky, Bernstein, Kolmogorov et leurs étudiants. Les liens et l'influence réciproque entre l'école soviétique et la France (Borel, Fréchet et Lévy) furent décisifs dans ces progrès et sont évidents dans la correspondance entre Fréchet et Levy pendant la guerre. En particulier, en France, une nouvelle génération très active s'était formée autour de Émile Borel et de l'Institut Henri Poincaré. Les cours du calcul des probabilités étaient assurés par Borel et Fréchet alors que Darmois enseignait la statistique. L'IHP devient, à partir des années 1930, un pôle très dynamique qui attirait un grand nombre de mathématiciens français et étrangers à travers ses conférences de statistique et probabilité. De l'autre côté, Paul Lévy enseignait à l'École Polytechnique, en occupant une position isolée jusqu'en 1940. Quelques années plus tard ce groupe fut élargi grâce à l'arrivée d'autres jeunes mathématiciens comme Robert Fortet, Michel Loeve et André Blanc-Lapierre. Le véritable développement et la consolidation de ce domaine sera à partir des années 1940 grâce à Ito, Feller, Fortet, Doob et Lévy.
Sur l'histoire du Calcul des Probabilités en France pendant le xx^{e} siècle voir [von Plato 1998] et les publications de Laurent Mazliak, Bernard Bru et Bernard Locker. Voir en particulier l'introduction à la correspondance entre Lévy et Fréchet et la correspondance même, publiées par les trois

Dans cette section nous examinerons l'approche probabiliste de Kampé de Fériet. Dans la première partie nous illustrerons son interprétation probabiliste du problème de la turbulence. Ensuite, nous verrons la manière dont cette interprétation s'applique à la théorie de Taylor-von Kármán. Enfin, nous ferons ressortir les analogies et les différences avec la théorie de Wehrlé et Dedebant ainsi que les réactions de Lévy à l'égard de leur calcul aléatoire fondé sur la dérivée aléatoire de Slutsky.

4.2.1 Une interprétation probabiliste du problème de la turbulence

L'approche probabiliste de Kampé de Fériet est explicite et fut introduite pour la première fois dans l'une de ses contributions majeures de l'époque, *Les fonctions aléatoires stationnaires et la théorie statistique de la turbulence* (1939) [Kampé de Fériet 1939a]. Dans le cadre de son interprétation probabiliste de l'écoulement d'un fluide turbulent homogène, il traite la vitesse turbulente comme une fonction aléatoire au sens de Kolmogorov, définition empruntée au célèbre *Grundbegriffe der Wahrscheinlichkeitsrechnung* contenant la présentation axiomatique du calcul des probabilités [Kolmogoroff 1933, 39]. Cette définition est énoncée par Kampé de Fériet de la façon suivante :

> "Soit $\mathcal{E}$ un ensemble d'événements E, formant un champ de probabilités, c'est à dire tel qu'on puisse attacher une probabilité à tout sous-ensemble de $\mathcal{E}$; soit Θ un ensemble de valeurs d'une variable réelle t : *une fonction aléatoire* $F_{\mathcal{E}}(t)$ est définie sur Θ si à chaque événement E on fait correspondre une fonction de t, $F(t,E)$ définie sur l'ensemble Θ. Le symbole $F_{\mathcal{E}}(t)$ représente donc l'ensemble de toutes fonctions $F(t,E)$ dont chacune est attachée à un événement E de $\mathcal{E}$. La réalisation d'un des événements E de $\mathcal{E}$ constitue une *épreuve*, la fonction aléatoire se réalise sous la forme de la fonction de t attachée à l'événement E correspondant. [Kampé de Fériet 1939a, 148]"

Il s'agit d'une première définition de fonction aléatoire. Elle se développera dans le temps en fonction des progrès de la théorie des fonctions aléatoires, une théorie encore jeune qui commence à s'édifier surtout à partir des années 1920 grâce aux premiers travaux de Sergei Bernstein et qui sera en constante évolution pendant cette époque-là grâce aux recherches de Norbert Wiener, Kolmogorov, Slutsky,

auteurs, ce qui fait ressortir l'état du domaine du calcul des probabilités des années 1930-1940 [Barbut et. al. 2014]. Sur Borel et l'Institut Henri Poincaré pendant l'entre-deux-guerres voir aussi [Mazliak et Catellier 2012] et [Mazliak 2010] ; sur Paul Lévy voir la thèse de Locker [Locker 2001] ; sur Fortet voir [Bru 2002] et sur Doeblin voir [Mazliak 2007]. Voir aussi le chapitre de Michel Loève contenu dans [Bourbaki 1974]

Khintchine, Paul Lévy, Bruno de Finetti, Cramer et d'autres mathématiciens. En effet, dans cette définition n'apparaît pas encore *explicitement* le concept d'espace de probabilité $(\Omega, \mathcal{S}, \mu)$ (Ω un ensemble abstrait, $\mathcal{S}$ une σ-algèbre de parties de Ω et μ une mesure sur les sous-ensembles de Ω tel que $\mu(\Omega) = 1$). Cependant, nous sommes loin de dire qu'il ne s'appuie pas sur la théorie de la mesure et l'intégrale de Lebesgue. Il s'agit simplement d'une question de notations différentes qui cache ce triple symbole. Par exemple, il est évident que $\mathcal{E}$ est "le champ des probabilités tel qu'on puisse attacher une probabilité à tout-sous ensemble de $\mathcal{E}$ " correspond à l'ensemble Ω. En outre, il introduit l'intégrale de Lebesgue pour définir la valeur probable (ou espérance mathématique) de la variable aléatoire de $F(t, E)$:

$$\overline{F(t,E)} = \int_{\mathcal{E}} F(t,E)P(dE)$$

Ce concept apparaîtra chez Kampé de Fériet seulement après la seconde guerre mondiale dans une définition de fonction aléatoire plus mature. Par exemple, dans son cours sur la théorie de la turbulence qui a eu lieu en Italie dans le Centro Internazionale di Matematica Estivo (CIME) de Varenne, le 1-10 septembre 1957, il définit la fonction aléatoire en faisant recours explicitement à la notion d'espace de probabilité :

> Plus généralement, étant donné un ensemble (abstrait) Θ, une fonction aléatoire sur Θ, est par définition, une fonction $f(\theta, \omega)$ à variables réelles sur le produit $\Theta \times \Omega$, telles que pour $\theta \in \Theta$ fixé, $f(\theta, \omega)$ soit une fonction mesurable de ω sur l'espace de probabilité $(\Omega, \mathcal{S}, \mu)$; à ce point de vue, une fonction aléatoire apparait donc comme un *ensemble de variables aléatoires*, une variable aléatoire correspondant à chaque $\theta \in \Theta$: pour un ω donné la fonction de ω définie sur Θ constitue un échantillon de la fonction aléatoire. [Kampé de Fériet 1957, 64]

Toujours dans son article [Kampé de Fériet 1939a], après avoir rappelé les résultats principaux de Khintchine, Slutsky et Kolmogorov servant de base à son travail, il les applique au problème d'un fluide turbulent homogène et stationnaire. La schématisation de ce problème de la mécanique des fluides au moyen des fonctions aléatoires mérite d'être détaillée.

Là, il imagine le fluide composé par des particules matérielles toutes douées d'une masse égale à l'unité, mobiles sur l'axe Ox. Chacune de ces particules aura à chaque instant $-\infty < t < +\infty$ une valeur bien déterminée de la vitesse $u(t)$ mais discontinue dans tous les instants t où les particules subissent un "choc", à savoir un changement de direction le long de l'axe x : en d'autres termes, il considère le choc comme une discontinuité de première espèce, les deux limites $u(t + 0)$ et $u(t - 0)$ existent mais sont différentes. Dans ce contexte, il suppose que les

mêmes particules, dont chacune des vitesses est repérée par une courbe $u(t)$, sont animées par un mouvement turbulent. C'est là, qu'il introduit la notion de fonctions aléatoire :

> "L'extrême complexité des courbes $u(t)$ individuelles conduit tout naturellement à appliquer les méthodes statistiques ; le schéma des fonctions aléatoires offre un moule parfaitement adapté à la mise en équation du problème ; *la vitesse turbulente sera alors une fonction aléatoire* $U_{\mathcal{E}}(t)$ définie pour l'ensemble $\mathcal{E}$ de toutes les particules, une épreuve E consistant à choisir une de ces particules et la suivre depuis $t = -\infty$ jusqu'à $t = -\infty$." [Kampé de Fériet 1939a, 12]

En d'autres termes, la vitesse turbulente sera représentée par l'ensemble de toutes les fonctions $U(t, E)$ de variable réelle t, chacune d'entre elles est attachée à un événement $E \subset \mathcal{E}$, où $\mathcal{E}$ est l'ensemble (probabilisé) de toutes les particules, chacune ayant une vitesses $u(t)$ bien déterminée. Par suite, l'événement $E \subset \mathcal{E}$ correspondra à "une particule qui parcourt une trajectoire du temps $t = -\infty$ jusqu'à $t = -\infty$". Si E est fixé, $U(t, E)$ sera la trajectoire de la particule $u(t)$ avec $-\infty < t < +\infty$. Si le temps $t \in \Theta$ est fixe, la fonction $U(t, E)$ est la variable aléatoire de la vitesse en une position précise déterminée par l' instant fixé t.

Ensuite, il traduit en langage aléatoire la condition de linéarité avec la relation $\overline{U(t, E)} = 0$ alors que celle de homogénéité, qui suppose que "les lois statistiques du mouvement sont indépendantes de l'instant choisi comme origine du temps", correspond à l'hypothèse de fonctions aléatoires stationnaires. Ces fonctions définies par Slutsky et Khintchine sont telles que, étant donné un ensemble fini de points $t_1, t_2, ..., t_n$, la valeur probable du produit :

$$U_1(t, E) \cdot \cdots \cdot U_1(t, E)$$

est invariante quand $t_1, t_2, ..., t_n$ subit une translation, c'est à dire qu'elle ne dépend que des différences $t_{t_2 - t_1}, ...t_{t_n - t_1}$. Enfin, d'après son schéma, la valeur probable de l'énergie cinétique sera une constante :

$$\overline{U(t, E)^2} = U_0^2$$

et le coefficient de corrélation des vitesses en deux instants t et $t + h$ ne dépend que de h :

$$\frac{\overline{U(t, E) \cdot U(t + h, E)}}{U_0^2} = \mathcal{R}(h)$$

Dans les pages suivantes, il propose des exemples (parmi lesquels le problème de Taylor de 1921) et, à l'aide de l'analyse harmonique et des théorèmes des ma-

thématiciens russes, il donne des définitions rigoureuses ainsi que des propriétés mathématiques relatives à des concepts de la statistique physique, comme le coefficient de corrélation, la fonction spectrale et leurs relations.

Pendant les mêmes années, Kolmogorov commence à s'intéresser à la théorie de la turbulence, et il s'entoure d'étudiants spécialisés dans ce domaine. Les premières applications de la théorie des fonctions aléatoires à la turbulence viennent de l'ingénieur mécanicien D. Millionshchikov (1939) et du mathématicien Alexandre Obukhov (1941) [Millionschikov 1939], [Obukhov 1941]. Dans *The decay of homogeneus and isotropic turbulence in a viscous incompressible fluid*, Millionshchikov avait étudié les champs des paramètres relatifs à un fluide turbulent homogène et isotrope en les considérant comme des champs aléatoires d'un point $X(t)$ dans un espace tridimensionnel : le champ de la vitesse sera alors spécifié par une mesure de probabilité dans l'espace fonctionnel de tous les champs de tous les vecteurs solénoïdaux (à la divergence nulle). De l'autre côté, Obukhov travaille sur le spectre de la turbulence relatif à la vitesse aléatoire $u(x)$. Ses résultats se trouvent dans son article *Spectral energy distribution in a turbulent flow* (1941) [43]. Au moment de la publication de sa note en 1939, Kampé de Fériet ne connaissait pas encore ces applications, ce qui confirme que Kampé de Fériet et les Russes sont arrivés à la même intuition de façon indépendante [44].

4.2.2 Kampé de Fériet vs Wehrlé et Dedebant. La critique de Paul Lévy à l'égard de la dérivée aléatoire

L'interprétation probabiliste de la turbulence proposée par Kampé de Fériet à partir de 1939 prend des formes différentes de celle de Wehrlé et Dedebant. Dans le troisième chapitre, nous avons vu que les deux polytechniciens de l'Office National Météorologique utilisent comme support *la théorie cinétique des gaz* et les courbes de fréquence ; leur théorie aboutira, à partir des années 1940, à une analyse aléatoire qui généralisera l'analyse classique et qui deviendra un instrument pour comprendre divers théories physiques, y compris la théorie de la turbulence.

43. Pendant la guerre ses travaux seront ignorés par le reste du monde et ils furent découverts seulement en 1946, grâce à la communication de George Batchelor, lors de l'ICAM de Paris 1946. Sur la contribution de l'école russe à la turbulence voir [Falkovich 2011] et [Yaglom 1994–01].

44. À la page 146 de [Kampé de Fériet 1939a], il écrit : " Sauf G. Dedebant et Ph. Wehrlé, dont c'est au contraire une des idées maîtresses, aucun des auteurs qui ont travaillé à la théorie des fonctions aléatoires ne semble avoir connu les problèmes posés par la turbulence, ni les essais de solution qu'ils avaient reçus. " Cette affirmation est suivie par une note où l'auteur avoue que, lors de la réalisation de cet écrit, il ne connaissait pas encore le mémoire de A. C. Paley, N. Wiener et A. Zygmund, intitulé *Notes on random functions*. En tout cas, il ne mentionne pas les applications de Millionshchikov et d'Obukhov.

Chez Kampé de Fériet, au contraire, le support n'est pas la théorie cinétique des gaz mais les théories modernes du *calcul des probabilités* avec lesquelles il essaye d'écrire en langage aléatoire les concepts statistiques de la turbulence définis par Taylor et von Kármán, en utilisant un formalisme mathématique rigoureux et élégant. Dans ses travaux, les mots "courbes de fréquence", "corpuscule et connexion aléatoire" "dépouillement statistique", "échelle synoptique" "équations aux valeurs probables", "distribution de Boltzmann" sont remplacés par "fonction aléatoire au sens de Kolmogorov", "analyse harmonique généralisée de Wiener", "écoulement homogène et stationnaire" "espace probabilisé", "tenseur de corrélation" et tous les théorèmes modernes du calcul de probabilités autour de ces notions. Nous verrons sa contribution dans la section suivante.

Cependant, Kampé de Fériet n'est pas complètement détaché des idées théoriques de Wehrlé et Dedebant. En premier lieu, c'est grâce à sa collaboration au niveau expérimental avec les deux polytechniciens qu'il dirige son attention vers l'applicabilité du calcul des probabilités à l'étude de la turbulence :

> Mais c'est à Ph. Wehrlé et G. Dedebant que revient le mérite d'avoir, dans une série de travaux parus de 1935 à 1940, explicitement et fortement attiré l'attention sur la nécessité d'utiliser, dans la théorie statistique de la turbulence, les résultats de la théorie des fonctions aléatoires qui se développait rapidement à cette époque. C'est sous leur impulsion que nous avons appliqué pour la première fois à la turbulence homogène les résultats que Kolmogorov, Khintchine et Wiener venaient de publier. [Blanc-Lapierre et Fortet 1953, 571]

En deuxième lieu, tous les trois s'appuient sur le même objet mathématique pour effectuer leurs calculs stochastiques : la dérivée aléatoire de Slutsky [45]. Les notions de dérivée et d'intégrale aléatoire de Slutsky, furent objet de critiques par Paul Lévy dans une série de lettres adressées à Maurice Fréchet pendant la guerre. Nous n'entrerons pas dans le détail de cette question car elle est déjà abordée par Bernard Locker dans sa thèse [46] .

Dans ces lettres à Maurice Fréchet, dont l'un des thèmes le plus discuté est l'intégrale stochastique -qui deviendra un sujet de recherche très étudié après la guerre- [Barbut et. al. 2014, 43], Lévy donne des contre-exemples montrant l'impossibilité de retrouver la fonction primitive à travers l'intégration de la dérivée aléatoire, et, par conséquent, l'impossibilité d'étendre les concepts de

45. Voir le troisième chapitre.

46. Sa thèse, concernant les travaux de Lévy en calcul stochastique pendant la guerre, contient aussi une histoire de l'intégrale stochastique en passant par celle de Slutsky (1928), Wiener (1932-1934), Paul Lévy (1939) et Itô (1944)

l'analyse classique à l'analyse aléatoire :

> " J'ai toujours eu l'impression que Wehrlé et Kampé de Fériet s'exagéraient l'importance de cette notion qui ne saurait à mon avis jouer en calcul des probabilités le même rôle que la dérivée ordinaire dans l'intégrale classique. Une remarque que j'ai faite récemment, en cherchant un exemple de fonction aléatoire admettant une dérivée aléatoire mais n'admettant de dérivée qu'en des points ne remplissant aucun intervalle, m'a confirmé cette opinion.
> Je considère le processus additifs défini par :
>
> $$\psi(z,t) = \log \mathcal{M}\{e^{iz[X(t+\tau)-X(t)]}\} = t\int_0^\infty (e^{izu}-1)dN(u)$$
>
> $N(u)$ étant non décroissant, $N(0) = -\infty$ $N(\infty)$ fini, $\int_0^1 u dN(u)$ fini.
> La fonction aléatoire $X(t)$ ainsi définie est, presque sûrement, constamment croissante (quoique ne croissant que par sauts) : or elle admet une dérivée aléatoire constamment nulle. Il est donc absolument impossible d'espérer retrouver la fonction initiale par intégration de la dérivée aléatoire...sauf évidemment dans des cas particuliers ; c'est là sans doute où cette dérivée est une dérivée au sens classique.
> Cela ne vous semble-il-pas justifier ma conclusion ?
> Notez que cet exemple n'est pas du particulier ni artificiel. Si vous avez sous les yeux mes formules concernant la forme générale des lois indéfiniment divisibles, celles que l'on rencontre dans les processus additifs continus, vous vous en convaincrez aisément. " [Lévy à Fréchet, le 6 septembre 1943 [47]]

Comprise l'importance de la moyenne quadratique, en 1943 Paul Lévy envoie une note à l'Académie des Sciences, *Dérivation, intégration et équations différentielles stochastiques* [Lévy 1944] en proposant une nouvelle notion de dérivation et d'intégration stochastique pour l'étude des processus stochastiques :

> "E. Slutsky, J. Kampé de Fériet et d'autres auteurs ont cru pouvoir faire reposer la théorie des fonctions aléatoires sur la notion de la dérivée pr [en probabilité]. Nous nous proposons de montrer que cette dérivée ne peut pas rendre les services qu'il est naturel d'attendre d'une dérivée. La notion un peu plus restrictive de dérivée m. q (en moyenne quadratique) est à ce point de vue plus intéressante". [Lévy 1944, 602]

Même quand il reconnaît l'importance de cette intégrale, Lévy voulait en effet

47. Lettre reproduite dans [Barbut et. al. 2014, 125].

prendre soin de différentier l'intégrale de Slutsky de la sienne, encore "plus stochastique" introduite en 1939. C'est une période où ce n'est que le début de ces notions et où mathématiciens et physiciens vivaient une sorte de "confluence désordonnée dans la création d'un calcul stochastique dans lequel chacun vit et prit dans une première étape ce qui l'intéressait dans sa spécialité jugeant de la part des autres à l'aune de ses propres préoccupations." [Locker 2001, 166]. Quoi qu'il en soit, la critique de Lévy concerne la fonctionnalité de la notion de dérivée aléatoire dans la théorie des processus stochastiques et ne tient aucun compte des applications de Kampé de Fériet à la turbulence [Locker 2001, 166].

À partir des années 1940, Kampé de Fériet quittera cette notion de Slutsky et il s'appuiera sur d'autres définitions du calcul des probabilités pour ses calculs stochastiques. Après la Libération, les travaux de Wehrlé et Dedebant seront presque oubliés, mais on continuera de mentionner l'attention qu'ils portaient au caractère aléatoire de la turbulence, qui restera en tout cas un aspect original de cette école. Dans le chapitre que Kampé de Fériet a rédigé pour le livre sur la théorie des fonctions aléatoires de R. Fortet et A. Blanc-Lapierre - qui constitue une synthèse de travaux réalisés jusqu'aux années 1950 - nous pouvons remarquer que toute sa contribution se développe indépendamment de la théorie de Wehrlé et Dedebant et de l'intégrale de Slusky, et se rapporte aux recherches de Norbert Wiener sur les fonctions aléatoires. Ces derniers sont simplement mentionnés comme ceux qui l'ont dirigé vers une approche probabiliste de la turbulence et vers les "résultats de A. Kolmogorov, A. Khintchine et N. Wiener", sans citer le nom de Slutsky.

4.3 Une généralisation de la théorie de Taylor-von Kármán

Dans cette section nous présenterons les travaux mathématiques de Kampé de Fériet qui font ressortir son interprétation probabiliste de la notion de la turbulence. Son but est de donner une formulation mathématique générale à la théorie de Taylor–von Kármán. Ses principales contributions dans ce sens-là concernent le problème de la diffusion, la température d'un fluide turbulent, le spectre de la turbulence, l'analyse du concept de moyenne. C'est là que l'on trouve ses travaux les plus féconds, qui gagneront en maturité après que Kampé de Fériet aura quitté l'IMFL, en 1946.

4.3.1 Le problème de la diffusion

Dans [Kampé de Fériet 1939a], le problème de la diffusion turbulente de Taylor ([Taylor 1922]) est ramené à l'étude des fonctions aléatoires stationnaires. Il s'agit

d'un exemple fondamental pour comprendre comment Kampé de Fériet utilise son interprétation probabiliste de la turbulence pour aborder des problèmes déjà étudiés au niveau statistique par Taylor, Von Kármán et d'autres, et aboutir à des résultats plus généraux.

Afin d'étudier le problème de la diffusion, Taylor avait envisagé une particule du fluide turbulent animée d'un mouvement brownien sur un axe Ox et douée d'une mémoire statistique [48]. Sa vitesse ne pouvait prendre que les deux valeurs $+U_0$ et $-U_0$ et les chocs se produisaient à des dates multiples d'un temps τ. Kampé de Fériet ré-interprète ce problème en langage aléatoire en le considérant comme cas particulier d'un problème plus général qui est le suivant.

Il considère une suite infinie dans les deux sens de variables aléatoires représentant les diverses vitesses aléatoires que la particule peut avoir à chaque instant fixé t de $-\infty$ à $+\infty$:

$$V_{-n}, V_{-n+1}, ..., V_{-1}, V_0, V1, ..., V_n$$

chacune de ces variables pouvant prendre les r valeurs :

$$u_1, ..., u_r$$

Afin de traduire en langage aléatoire le fait que la particule est douée d'une mémoire statistique, il suppose que les variables aléatoires V_i sont liées par des probabilités en chaîne : la probabilité de passage p_{ij} que la vitesse de la particule V_{n+1} à l'instant $n+1$ prenne la valeur u_i, si à l'instant précédent n la réalisation de la variable aléatoire V_n est u_j, ce qui permet de calculer la probabilité $P_j^{(n+1)}$ que $V_{n+1} = u_j$ grâce à la formule :

$$P_j^{(n+1)} = \sum_{i=1}^{i=r} p_{ij} P_i^{(n)}$$

Ainsi, si pendant un trajet sa vitesse est u_i, "elle n'a pas les mêmes chances de prendre au trajet suivant n'importe quelle autre vitesse u_j ; les probabilités p_{ij} lui imposeront des préférences statistiques". Ceci étant, il considère une nouvelle variable aléatoire B prenant toute valeur β entre 0 et τ et il suppose que, pour réaliser une épreuve E en suivant une particule, il suffit de "choisir pour B une

48. Une particule douée d'une mémoire statistique est une particule dont la corrélation entre ses vitesses en deux instants successifs (ou deux points successifs) est non nulle. Il en résulte que les deux vitesses ne sont pas indépendantes au point de vue statistique et la première influence la deuxième. L'intervalle de temps dans lequel la particule oublie sa vitesse initiale et le processus dévient complètement aléatoire est l'échelle de corrélation temporelle.

valeur particulière β et à donner à chacune des V_n une des valeurs u_i ; nous définissons alors :

$$U(t,E) = u_i\,;\ n\tau < t + \beta < (n+1)\tau$$

si V_n a pris dans cette épreuve précisément la valeur u_i". Cette fonction est stationnaire seulement si les probabilités $P_i^{(n)}$ que $V_n = u_i$ $(1 < i < r)$ sont indépendantes de n.

Enfin, il retrouve le problème de Taylor dans le cas particulier où la vitesse ne prend que deux valeurs :

$$u_1 = U_0\,,\ u_2 = -U_0$$

et il conclut :

> 'Or, dans ce cas particulier, le mouvement particulier se fait précisément selon le schéma qui a servi de point de départ à toutes les recherches de G.I. Taylor [[Taylor 1922] et [Taylor 1935]] et les équations ci-dessus ne font pas autre chose que de traduire ses résultats dans le langage de la théorie de la fonction aléatoire".

4.3.2 La température aléatoire d'un fluide turbulent

Il s'agit de la première contribution mathématique de Kampé de Fériet à la généralisation des résultats de Taylor et von Kármán et elle remonte à 1937 [Kampé de Fériet 1937d]. Dans cette note très courte, il donne les équations complètes de la fluctuation de la température dans un fluide turbulent. Taylor avait donné ces équations pour un fluide incompressible en 1932, Kampé de Fériet les déduit dans le cas compressible en utilisant la formule de Fourier–Kirchhoff de la diffusion thermique et la décomposition de Reynolds de la température.

4.3.3 La notion de spectre de la turbulence

Sur le spectre de la turbulence homogène (1939)

Kampé de Fériet consacre plusieurs notes sur la répartition de l'énergie d'agitation entre les fréquences, dont la première est intitulée *sur le spectre de la turbulence homogène* et remonte à 1939 [Kampé de Fériet 1939c]. On peut donc déduire que son intérêt pour l'étude du spectre de la turbulence est né, comme pour les fonctions aléatoires, dans la période où il a dirigé l'IMFL. Taylor, dans son travail sur le spectre de la turbulence [Taylor 1938], l'avait supposé continu. Kampé de Fériet généralise ces résultats en prenant en compte à la fois des spectres continus et discrets (*bandes et raies*) et indique les cas où il est possible de négliger la présence

de raies dans le spectre, ce qui est intéressant pour les expériences dans les soufleries. Cette note a été rédigée avant la note [Kampé de Fériet 1939a], c'est à dire avant que Kampé de Fériet n'introduise son interprétation probabiliste originale fondée sur la définition de fonction aléatoire de Kolmogorov, ce qui marquera le début des ses contributions les plus fécondes pendant les années 1940 et 1950. Par suite, les idées contenues dans cette publication sur le spectre, sont encore marquées par le point de vue de Wehrlé et Dedebant et la définition d'intégrale aléatoire de Slutsky. Il s'agit de la seule note théorique où Kampé de Fériet semble faire partie de cette école en tant que mathématicien plutôt qu'expérimentateur. Elle se fonde en effet sur une définition de fonction aléatoire encore liée à Wehrlé et Dedebant. C'est pour cette raison que nous nous attarderons sur cette note.

Dans cette note, il interprète la vitesse d'agitation d'une particule, dénotée par $U(t)$, comme une fonction aléatoire au sens de Slutsky, dont la condition de fluide homogène correspond à la classe des fonctions aléatoires stationnaires. D'après cette définition, le déplacement d'une particule est donné par :

$$X(t) = \int_0^t U(s)ds$$

et les moments d'ordre 1 (valeur moyenne) et d'ordre 2 (dispersion) sont :

$$\overline{X(t)} = 0,\ \overline{X(t)^2} = U_0^2 \int_0^t \int_0^t \mathcal{R}(s_2 - s_1)ds_1 ds_2 \tag{4.14}$$

Or, d'après le théorème de Khintchine, pour que $\mathcal{R}(h)$ soit le coefficient de corrélation de la fonction aléatoire stationnaire $U(t)$, il faut et il suffit qu'il existe une fonction $\mathcal{F}(\lambda)$ monotone non décroissante tel que $\mathcal{R}(h)$ soit représentée par l'intégrale de Fourier-Stieltjes :

$$\mathcal{R}(h) = \int_{-\infty}^{+\infty} \cos\lambda\, h\, d\mathcal{F}(\lambda)$$

qui correspond, dans le domaine de la turbulence, à la relation entre le coefficient de corrélation $\mathcal{R}(h)$ et le spectre de la turbulence $\mathcal{F}(\lambda)$ sur lequel Taylor avait travaillé au niveau expérimental ainsi qu'au niveau théorique à l'aide de la théorie de Wiener. Ceci étant, en replaçant la valeur de $\mathcal{R}(h)$ dans les formules 4.14 et en décomposant $\mathcal{F}(\lambda)$ en

$$\mathcal{F}_\rfloor(\lambda) + \mathcal{F}_\int(\lambda) \tag{4.15}$$

où $\mathcal{F}_\rfloor(\lambda)$ est continue et $\mathcal{F}_\int(\lambda)$ sa fonction des sauts ayant au plus une infinité dénombrable de discontinuités α_j, il obtient une relation de $\overline{X(t)^2}$ "où les deux

premiers termes expriment l'influence des raies et le troisième celui de bandes". L'étude de cette relation le conduit vers les trois cas qui excluent la présence de raies dans le spectre. Nous pouvons voir que, comme dans la théorie de Wehrlé et Dedebant, ce point de vue ne suppose pas l'existence d'un espace probabilisé où choisir au hasard "une" particule et la suivre. En revanche, il analyse une particule individuelle quelconque du fluide parmi celles en mouvement sur Ox et exprime la composante turbulente de sa vitesse au moyen de la fonction aléatoire $U(t)$.

Dans sa célèbre note [Kampé de Fériet 1939a] inaugurant sa nouvelle approche probabiliste, Kampé de Fériet reprendra à la base ce résultat et lui donnera des habits mathématiques différents, en l'introduisant dans le cadre d'une discussion plus complète et rigoureuse des relations entre les coefficients de corrélations et la fonction spectrale, à travers un nombre assez considérable de théorèmes [Kampé de Fériet 1939a, 28]. Cette note marquera la fin de l'étude de la turbulence au moyen des fonctions aléatoires au sens de Slutsky et le début d'un éloignement progressif des idées de Wehrlé et Dedebant.

Le "tenseur spectral".

Ces études sur le spectre de la turbulence conduiront Kampé de Fériet à introduire le concept de tenseur spectral en 1948 [Kampé de Fériet 1948]. Ce tenseur est susceptible de remplacer, dans un écoulement homogène, mais non nécessairement isotrope, le tenseur de corrélation d'un écoulement isotrope défini par von Kármán et Howarth en 1938 [von Kármán et Leslie 1938]. C'est donc une généralisation du tenseur de corrélation de von Kármán au cas non isotrope. Les composantes du tenseur de corrélation de von Kármán $R_{j,k}(h)$ sont alors les transformées de Fourier des composantes du tenseur spectral $\phi_{j,k}(\lambda)$. La correspondance entre les deux tenseurs est définie par :

$$R_{j,k}(h) = \overline{u_j(x')u_k(x)} = \int_\Lambda e^{i\lambda h}\phi_{j,k}(\lambda)d\lambda$$

où les u_i $(i = 1, 2, 3)$ sont les composantes de la vitesse en un point du fluide, qui sont des fonctions aléatoires stationnaires définies au sens de Kolmogorov. Dans le cas d'un fluide incompressible, le tenseur spectral a une forme bien précise : il est composé d'un tenseur qui donne la composante isotrope et un deuxième tenseur anisotrope.

Ce travail, présenté à l'ICAM de Londres en 1948, représente une rupture avec sa note de 1939. En effet, la note de 1939 se fonde encore sur la définition de fonction aléatoire au sens de Slutsky alors que [Kampé de Fériet 1948] se fonde sur

la nouvelle interprétation probabiliste de Kampé de Fériet qui prend en compte la définition de Kolmogorov et que nous avons décrite dans la deuxième section de ce chapitre. Cette note marquera le début de toute une série de publications entre les années 1950 et 1960 visant à donner une forme plus générale à la notion de tenseur spectral de la turbulence.

4.3.4 L'analyse du concept de moyenne

Il s'agit de la contribution de Kampé de Fériet la plus reconnue tant au niveau national qu'international. En faisant une analyse mathématique des concepts de moyenne temporelle et spatiale dans la théorie ordinaire de la turbulence, il montre l'inadéquation de leurs définitions classiques et il indique les conditions que doit satisfaire la définition de moyenne pour que les équations de Reynolds [49] $\mathcal{R}$ – qui sont au fondement de la théorie de la turbulence – soient une conséquence logique de celles de Navier–Stokes $\mathcal{N}$ dans la mécanique des fluides.

Déjà, en 1934 ([Kampé de Fériet 1934–1935]), il se rend compte que les moyennes temporelle et spatiale n'ont pas des définitions rigoureuses lorsqu'il essaye de comprendre quelles sont les propriétés de la moyenne, nécessaires et suffisantes, afin que les $\mathcal{R}$ se déduisent *rigoureusement* de $\mathcal{N}$. Là, il considère une grandeur physique quelconque du fluide f figurant dans les équations de Navier–Stokes (vitesse u_j $(j = 1, 2, 3)$ ou pression $p(x, t)$, par exemple) et sa décomposition de Reynolds :

$$f = \overline{f} + f'$$

et il trouve que les propriétés de la moyenne tel que $\mathcal{N} \longmapsto \mathcal{R}$ se réduisent à un système de 4 règles :

$$\text{Règle 1}, \ \overline{f+g} = \overline{f} + \overline{g}$$

$$\text{Règle 2}, \ \overline{\alpha f} = \alpha \overline{f}$$

$$\text{Règle 3}, \ \overline{\overline{f}\,g} = \overline{f}\,\overline{g}$$

$$\text{Règle 4}, \ \overline{f} = 0$$

$$\text{Règle 4'}, \ \overline{\overline{f}} = \overline{f}$$

Ceci étant, il fait la remarque suivante :

> "Les règles 1 et 2 se démontrent en remarquant que, dans tous les cas, l'opération qui fournit $\overline{f}$ est linéaire ; par contre, les règles 3 et 4

49. Elle s'obtiennent en remplaçant la vitesse u_j $(j = 1, 2, 3)$ et la pression $p(x, t)$ avec leur décomposition de Reynolds ($u_j = \overline{u_j} u'_j$, $p = \overline{p} + p'$) dans les équations de Navier–Stokes

> constituent des véritables postulats et ne peuvent être vérifiées que si l'on accorde à la fonction f des propriétés très particulières ; pour ne pas interrompre l'exposé, je rejette plus loin leur examen critique." [Kampé de Fériet 1934–1935, 39]

En d'autres termes, ce système de règles conduit à la conclusion que les définitions de moyenne temporelle et spatiale introduites respectivement par Boussinesq et Reynolds en 1872 et 1895 ne sont de bonnes définitions rigoureuses (elles satisfont les 4 règles) que pour des cas particuliers. Les seuls cas sont ceux où le mouvement moyen du fluide est permanent (indépendant du temps) et uniforme (indépendant de l'espace) alors que dans des problèmes importants de la turbulence comme celui de la décroissance de la turbulence, le mouvement n'est ni uniforme, ni permanent. En effet, dans le problème de la décroissance de la turbulence, si on utilise la moyenne de Reynolds et Boussinesq, les 4 règles ne sont plus valides et les équations de Reynolds ne peuvent pas être déduites de celles de Navier-Stokes, ce qui équivaut à dire qu'il n'est pas possible d'exprimer le mouvement d'agitation avec le tenseur de Reynolds $\rho\overline{u_i'u_k'}$. Il faut donc trouver une nouvelle définition de moyenne $\overline{f}$. Comment aborder ce problème ?

Le langage algébrique pour trouver une bonne définition de moyenne

Les premières solutions partielles de Kampé de Fériet ont été présentées à l'ICAM de Paris en 1946. Von Kármán, qui a assisté à sa communication, croit que son étude critique des 4 règles mène à une axiomatisation du problème de la turbulence mais Kampé de Fériet lui explique que son problème est d'une autre nature :

> "Hier, vous avez soupçonné une sorte de truc métaphysique dans mon article, parlant d'une tentative d '"axiomatisation" du problème de la turbulence ; il n'y a pas un truc de ce genre. [...] Mon article donne une solution complète, je crois, à cette question :
> si nous souhaitons que f satisfasse les équations de Navier-Sokes et en même temps, que $\overline{f}$ satisfasse les équations de Reynolds, quel type de définition devons-nous utiliser pour le processus moyen "–" et à quel type de fonctions pouvons-nous appliquer cette moyenne ? "
> S'agit-t-il de philosophie ou d'un progrès scientifique ?" [50] [Kampé de

50. "Yesterday you have suspected some kind of methaphysical trick in my paper, speaking of a tentative "axiomatisation" of the Turbulence Problem ; there is not a trick of that kind. [...] My paper give a complete solution, I believe, for that question :
If we wish that f satisfies the Navier-Sokes equations ans at the same time, $\overline{f}$ satisfeis the Reynolds equations, what kind of definition must we use for the average process "–" and at what type of functions may we apply that averaging process ?"

Fériet à von Kármán, le 25 septembre 1946 [51]]

Dans deux notes en 1949, avec les titres *Sur un problème d'algèbre abstraite posé par la définition de la moyenne dans la théorie de la turbulence* ([Kampé de Fériet 1949a]) et *Turbulencia* ([Kampé de Fériet 1949b]), il trouve une solution plus complète (mais encore partielle) sur un plan très abstrait, avec l'utilisation du langage algébrique. Dans les détails, il définit la moyenne comme une transformation T qui fait correspondre à une fonction f (une grandeur physique quelconque du fluide) sa moyenne $\overline{f} = T(f)$. Afin que les 4 règles soient respectées, il faut introduire la fermeture par rapport à la somme, le produit et le produit par un scalaire. Par conséquent, l'ensemble des fonctions sur lesquelles T agira doit être un *anneau* $\mathfrak{R}$. Ainsi, les fonctions f seront définies pour tout $x \in X$ où X est un ensemble abstrait ; la transformation T, sera appelée *transformation de Reynolds* si elle est une application de $\mathfrak{R}$ sur lui-même tel qui satisfait aux conditions suivantes :

$$T(f+g) = T(f) + T(g) \tag{4.16}$$

$$T(\alpha) = \alpha T(f) \tag{4.17}$$

$$T(fT(g)) = T(f)T(g) \tag{4.18}$$

Là, il trouve toutes les transformations de Reynolds dans le cas où l'ensemble X ne contient qu'un nombre fini de points [Kampé de Fériet 1949a] et dans le cas plus général d'un ensemble X quelconque et où l'anneau $\mathfrak{R}$ est formé par toutes les fonctions f qui prennent un nombre fini de valeurs mais ce nombre n'est pas borné sur l'anneau [Kampé de Fériet 1949b]. Les deux notes ont attiré l'attention de plusieurs mathématiciens comme Garret Birkhoff et Marie Louise Dubreil Jacotin, lesquels ont apporté une importante contribution à ce problème. Birkhoff résout le cas où X est un ensemble compact et $\mathfrak{R}$ est l'anneau de toutes les fonctions continues sur X ; Dubreil Jacotin approfondit le problème en introduisant la notion de transformation de Reynolds et elle étudie la partition de X dont les classes sont T idempotents.

La notion de moyenne statistique : une solution complète au problème

En 1955, Kampé de Fériet propose une autre solution -plus générale et qui s'éloigne de l'algèbre- avec l'introduction d'une troisième moyenne, la moyenne statistique, qui vient de la mécanique statistique de Gibbs. Ainsi, la grandeur physique $f(x,y,z,t)$ du fluide sera vue comme un échantillon de la fonction aléatoire $f(x,y,z,t,\omega)$ où ω est le paramètre choisi aléatoirement dans l'espace de

Is-That Philosophy or Scientific Progress ?

51. [Archives California Institute of Technology (Caltech), Papers of Theodore von Kármán, Box/Folder 14.48]

probabilité (Ω, F, μ). La moyenne statistique $\overline{f}$ sera :

$$\overline{f(x,y,z,t)} = \int_{\omega} f(x,y,z,t,\omega)$$

D'après Kampé de Fériét, ces concepts de la mécanique statistique peuvent s'introduire dans les équations de la mécanique des fluides en remplaçant les champs de vitesses $u(x,y,x,t)$ et de la pression $p(x,y,z,t)$ par un champ de vitesses et de pression aléatoires $u_j(x,y,z,t,\omega)$ $(j = 1,2,3)$, $p(x,y,z,t,\omega)$, en définissant le mouvement moyen par la moyenne statistique : $\overline{u_j(x,y,z,t,\omega)}$, $\overline{p(x,y,z,t,\omega)}$. Dans ce cas, les 4 règles sont satisfaites et on peut déduire les équations de Reynolds.

La moyenne statistique représente un outil efficace pour éliminer ces difficultés, mais elle est trop abstraite et ses valeurs sont impossibles à obtenir par des mesures directes alors que les données expérimentales fournissent toujours une moyenne temporelle. C'est cette dernière qui est toujours utilisée par les expérimentateurs pour mesurer les fluides turbulents. Elle est donc utilisée tacitement dans les problèmes théoriques à cause de son importance pratique. C'est pour cette raison que ce type de recherche ouvrira à de nouvelles thématiques de recherches autour du théorème ergodique. Ce théorème sera d'importance capitale pour comparer les moyennes temporelles à celles statistiques, et plus en général, pour comparer les déductions de la théorie avec les données expérimentales. Dans ce contexte, Kampé de Fériet consacrera diverses publications à ce sujet à partir des années 1950. Son lien scientifique avec Birkhoff a été sans doute assez fructueux dans ce type de recherches ainsi que dans celle plus générale d'étendre le point de vue de la mécanique statistique de Gibbs à la théorie de la turbulence.

4.4 Un spécialiste de mathématiques appliquées plus américain que français ?

Dans cette section nous essayerons de questionner la place de Kampé de Fériet au sein de la "communauté de mécanique des fluides française". Nous verrons que, si on compare les éléments qui nous indiquent son insertion dans le milieu de la mécanique des fluides française et américaine, dans ces dernier cas les éléments sont plus nombreux : d'après ces éléments, sa valeur internationale semble être plus reconnue aux États-Unis qu'en France. Malgré ses distances explicites avec Villat, il est très apprécié, très estimé par les probabilistes français notamment par Paul Lévy et par Maurice Fréchet. D'après certaines lettres retrouvées dans le fonds Fréchet et le fonds von Kármán, il semble parfois jouer un rôle d'intermédiaire entre le milieu des probabilistes françaises et celui des américains. Avant

d'analyser sa position au sein de ces milieux, nous jugeons important le fait de comprendre si à cette époque-là, nous pouvons déjà parler d'une communauté de mécanique des fluides en France.

4.4.1 Quelques considérations sur le concept de communauté en mécanique des fluides

Au début du xx^{e} siècle, les mathématiciens, les ingénieurs et les physiciens intéressés par la mécanique appliquée commencent à sentir l'exigence de s'identifier en une figure scientifique particulière qui se distinguait de plus en plus du physicien et du mathématicien [Battimelli 1986, 5]. Leur idée était d'établir un nouveau domaine, *la Mécanique appliquée* qui devait être "indépendante" des mathématiques, physique et ingénierie et qui se focaliserait sur des domaines comme la mécanique des fluides, l'élasticité, la plasticité, dynamique des solides, vibrations et acoustique, thermodynamique etc. La première communauté de mécanique des fluides, et plus en général de mécanique appliquée, se trouve en Allemagne. Grâce surtout aux écoles de Prandtl (Gottingen) et von Kármán (Aachen), cette communauté s'était formée à partir des années 1920 autour du journal de Von Mises *Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik (ZAMM)* et la nouvelle Société de Mécanique et Mathématiques appliquées (Gesellschaft für Angewandte Mathematik und Mechanik - GAMM)[Eckert 2007]. Ensuite, cette volonté de s'identifier dans la figure de mécanicien appliqué commence à se diffuser dans les autres nations ; en d'autres termes elle commence à s'internationaliser [52]. C'est dans cet esprit que von Kármán, Levi-Civita et Burgers organisent les premières Congrès Internationaux de Mécanique Appliquée (ICAM) [53], autour desquels une communauté internationale de mécanique des fluides commence à se développer à partir des années 1920.

Dix ans plus tard, l'arrivée de Hitler obligera von Kármán à quitter l'Allemagne [54]. Son immigration aux États-Unis et la conséquente fondation du Guggenheim Aeronautical Laboratory à Pasadena, suscitera non seulement une importation de la tradition de l'école de mécanique des fluides de Prandtl aux États-Unis mais encore la création, auprès de cet institut, d'un important point de référence de la communauté internationale de mécanique des fluides autour des ICAM. Après la seconde guerre mondiale, l'ICAM de Paris 1946 offrira l'opportunité pour

52. Voir [Eckert 2007] sur l'internationalisation de la mécanique des fluides pendant les années 1920.

53. Sur l'ICAM voir le deuxième chapitre

54. Sur l'immigration des scientifiques juifs et antinazis aux États-Unis et l' l'internationalisation conséquente des mathématiques appliquées américaines voir par exemple [Segal 2002] ; sur le cas particulier de von Kármán voir [Greenberg et Googstein 1983] et le troisième chapitre.

discuter sur une possible évolution de ce congrès en un organisme plus permanent doué d'un bureau, un secrétaire et un président. Ces discussions donneront lieu, le 26 décembre 1946, au IUTAM (Union international des Mécaniques théoriques et appliquées) encore existant aujourd'hui [55]. En ce qui concerne les journaux internationaux de mécanique des fluides, il faudra attendre les années 1950 pour avoir le *Journal of Fluid Mechanics* (1956) du physicien anglais George Batchelor et le journal américain *Physics of Fluid* (1958), fondé par l'élève de Kampé de Fériet, Naftali Frenkiel.

Si une communauté de mécanique des fluide existe déjà en Allemagne et au niveau international autour des ICAM, quelle est la situation de la France ? Est-ce que nous pouvons effectivement parler de communauté de mécanique des fluides ? Dans ce cas la réponse n'est pas claire, il faut agir avec prudence. Afin d'examiner cet aspect, nous nous appuierons sur la définition de l'historienne Karen Parshall, selon laquelle une communauté (pas forcément mathématique) est "*"un groupe interactif de personnes liées par un intérêt commun"* [Parshall et Rowe 1994, 16]. Cette définition sera formalisée plus tard par Amy Ackerberg-Lastings dans le cas des mathématiques [Zack et Landry 2016, 181-192]. Analysons cette définition dans le cas de la mécanique des fluides en France.

Tout d'abord, l'intérêt commun est la mécanique des fluides. Plus précisément, le but est de faire progresser les aspects théoriques et/ou pratiques de la mécanique des fluides pour permettre un avancement du point de vue scientifique et technique de l'aéronautique, l'hydraulique et d'autres domaines d'application de ce domaine. Ensuite, outre l'intérêt commun, l'appartenance à ce groupe et le statut sont facilement identifiables avec quelque chose de mesurable et concret [Zack et Landry 2016, 184] si nous pensons à l'affiliation institutionnelle aux instituts et chaires de mécanique des fluides du ministre de l'Air, et leurs fonctions dans le domaine de l'éducation et de la recherche. De plus, comme c'est le cas de la communauté internationale, les membres de ce groupe se distinguent de la communauté des mathématiciens et des physiciens [56]. En premier lieu, au contraire des physiciens et des mathématiciens, l'activité des mécaniciens des fluides est

55. Pendant les premières années du IUTAM, il y avait Richard Vynme Southwell comme président, Burgers secrétaire et Dryden trésorier. Il s'agit d'une organisation de la même nature que les Unions Internationales de la physique, de la chimie, mathématiques, géophysique, astronomie, géodésie, géographie, et radioscience. Grâce à cette organisation, les mécaniciens pouvaient entreprendre des collaborations avec les spécialistes des autres unions. Sur l'histoire du IUTAM voir [IUTAM 2016].

56. Sur la communauté mathématique voir [Parshall et Rice 2002] ; sur celle des physiciens voir par exemple [Pestre 2004]. Pour "mathématiques" et "physique" nous nous référons respectivement aux mathématiques pures et aux physiques fondamentalistes.

organisée sur la base d'une politique nationale de recherche gérée par le ministre de l'Air. En deuxième lieu, il y a des différences au niveau de la recherche et de l'enseignement. D'un côté, ils diffèrent des mathématiciens parce qu'ils s'intéressent aux applications ou aux consolidations des principes mathématiques de la mécanique des fluides plutôt que aux nouvelles investigations mathématiques. De plus, leurs cours de mécanique des fluides ne s'adressent pas seulement aux mathématiciens mais aussi aux ingénieurs et techniciens ; parfois, même si cela est plus rare, ils participent activement aux travaux en équipe avec eux. Pérès, Villat et Kampé de Fériet s'inscrivent parfaitement dans ce cadre. De l'autre côté, ils se distinguent des physiciens fondamentalistes car ces derniers ont abandonné les questions de mécanique classique pour aborder d'autres nouvelles théories notamment la théorie de la relativité, la théorie quantique et les modèles atomiques de Bohr et Sommerfeld, la mécanique ondulatoire et, plus tard, la physique nucléaire [Pestre 2004, 3].

Jusqu'à maintenant, ces caractéristiques marquent impeccablement les frontières de cette communauté. Toutefois, des problèmes surgissent en ce qui concerne les interactions entre les membres de ce groupe : s'agit-il d'un groupe interactif ? Dans le but d'organiser et coordonner la recherche dans les divers laboratoires, Albert Caquot avait suscité la création du Conseil Supérieur des Recherches Scientifiques Intéressant l'Aéronautique (CSRSA), un conseil composé par le ministre de l'Air, la Faculté des Sciences, des ingénieurs civils, et le Service Technique de l'Aéronautique. Ce conseil contrôlait les activités des instituts et il proposait ou refusait la publication de leurs travaux dans la revue *Publications Scientifiques et Techniques du ministère de l'Air* (1928–1940), avec 160 fascicules publiés avant 1940 [Fontanon 2017]. Malgré le grand nombre des comptes rendus publiés, cette revue ne recueillera principalement que des collaborations scientifiques ou des travaux techniques que les divers laboratoires des instituts ont effectué pour le ministre de l'Air et l'industrie. Les recherches théoriques étaient plutôt publiées sur les Comptes Rendus de l'Académie des Sciences et sur des journaux mathématiques ou physiques comme par exemple le *Mémorial des Sciences Mathématiques* édité par Villat. En effet, cette décision du ministre de l'Air avait suscité des tensions surtout chez Henri Villat, lequel ne veut pas "facilement céder à la dérive utilitariste d'un champ scientifique dont il est le chef de file"[Fontanon 2017].

Les raisons pour lesquels la revue de Villat a été conçue ainsi que l'absence d'un événement institutionnel permettant aux divers spécialistes français de mécanique des fluides de se réunir périodiquement pour discuter de leurs travaux, nous montre de faibles interactions scientifiques. Cependant, il y a en même temps la présence d'un organisme institutionnel tel que le CSRSA, et plus en général le

ministre de l'Air qui les unifie et oriente leurs recherches. Jusqu'à quel point cet organisme représente le lieu de leurs interactions ? Il faudra aussi comprendre quel est le rôle de la Société Hydrotechnique de France (SHF) au sein de ce groupe, laquelle coordonne les laboratoires d'hydraulique comme celui de Nancy ou de Grenoble.

Un autre élément sur lequel on peut se pencher est le fait que le groupe français de la mécanique des fluides interagit avec la communauté internationale (et donc avec les membres du groupe français) à travers la participation aux ICAM. Cette participation se groupait "sous l'égide du Comité national de Mécanique", un organisme saisi par Villat, Jouguet et Hahn -les représentants de la France dans le comité international des ICAM jusqu'en 1946 - dont le but était de centraliser la préparation française et "d'apporter dans la contribution française une certaine unité et assurer sa qualité" [57]. Ce comité jouait un rôle d'interface entre la communauté internationale et les mécaniciens des fluides français. Il coordonnait les missions à l'étranger, la publication des mémoires présentés pendant les congrès ainsi que la diffusion des appels à communication aux intéressés. Il assurait également une partie des subventions pour faciliter les déplacements [58]. En 1949, le comité sera rattaché au IUTAM en tant qu'organisation nationale référente.

L'ensemble de ces raisonnements nous penchent à adopter le mot "communauté" pour désigner ce groupe français de mécanique des fluides structuré autour du ministre de l'Air et Villat. En même temps nous conservons l'idée que ce mot doit être utilisé avec précaution. En effet, si d'un côté l'existence de cette communauté est légitimée par la présence d'une entité institutionnelle (ministre de l'Air), la participation des divers spécialistes de la mécanique des fluides aux ICAM, et l'existence de divers éléments qui la distinguent des communautés des mathématiciens et des physiciens, de l'autre côté elle souffre encore d'une faiblesse d'interactions entre les divers membres qui la constituent. A titre d'exemple nous pouvons aussi penser au fait que les Journées Scientifiques et Techniques de la Mécanique des Fluides de Lille en 1934 lors de l'inauguration de l'IMFL, sont le seul évènement institutionnel où les mécaniciens des fluides provenant de toute la France se sont rencontrés avant la seconde guerre mondiale. C'est pour cette raison que nous préférons utiliser le mot communauté à l'intérieur des guillemets.

En supposant qu'elle existe, le leader incontestable de cette "communauté" était

57. Jouguet à Kampé de Fériet, date non précisée, [Archives de l'ONERA Lille, Fonds Kampé de Fériet].

58. Sur l'activité du comité national voir par exemple l'ensemble de lettres officielles que Jouguet a envoyé à Kampé de Fériet afin de gérer sa participation à l'ICAM de Cambridge en 1938 [Archives de l'ONERA Lille, Fonds Kampé de Fériet].

sans doute Henri Villat pendant l'entre-deux-guerres. En effet, ce mathématicien avait un fort pouvoir décisionnel sur les politiques éditoriales, les échanges entre la France et l'étranger à travers les congrès ICAM, sur le choix des titulaires des diverses chaires de mécanique des fluides des universités de province, et sur les programmes d'enseignement suivis dans les divers instituts. En outre, il avait une position dominante en tant que membre de jury de thèse en ce qui concerne les travaux de mécanique des fluides, en s'adressant à la fois aux mathématiciens et aux ingénieurs. A propos de ce *patron*, Hélène Gispert écrit :

> Deuxième rapporteur de thèses, cinquième président de jury à la faculté des sciences de Paris, Villat occupe également une position éditoriale importante pendant notre période et apparaît comme un personnage incontournable dans le paysage mathématique français. En même temps son œuvre mathématique est exclusivement consacrée à la mécanique des fluides. Il est l'homme de ce domaine qui fait partie des sciences mathématiques entre 1914 et 1945 au même titre que des disciplines plus traditionnellement évoquées pour décrire ce milieu, comme l'analyse, la géométrie ou en encore l'algèbre. [Gispert et Leloup 2009, 90]

Après la guerre cette communauté en mécanique des fluides évoluera grâce aussi à la création de l'ONERA et du CNRS. Cependant, ce concept restera encore obscur et difficile à définir..

4.4.2 Kampé de Fériet vs Villat ou jusqu'à quel point "on se rend bien compte de sa valeur" au sein du milieu autour de Villat

Malgré la valeur internationale de ses recherches, Kampé de Fériet, au contraire de Joseph Pérès, par exemple, reste presque inconnu en France. À ce propos, Paul Lévy écrit dans une lettre à Fréchet :

> "La conférence de Kampé de Fériet était très intéressante. Il est toujours très intéressant. Il est très estimé en Amérique, mais je me demande si en France on se rend bien compte de sa valeur". [Barbut et. al. 2014, 154]

Comme la "communauté" de l'époque était structurée autour d'Henri Villat, il faudra prendre en compte ses rapports avec ce mathématicien parisien, pour comprendre, au moins partiellement, les raisons pour lesquelles Lévy fait une telle affirmation. On a vu dans les sections précédentes que les premiers travaux d'hydrodynamique de Kampé de Fériet allaient dans la même direction que ceux de Villat et que les deux mathématiciens ont commencé à s'éloigner l'un de l'autre

au moment où Kampé de Fériet a orienté ses intérêts vers la théorie de la turbulence anglo-américaine, les questions expérimentales et les solutions aléatoires. Villat, au contraire, à l'aide d'une approche explicitement déterministe, continue à donner la priorité aux aspects analytiques de la mécanique des fluides, en étudiant les solutions exactes et sans aborder directement les questions expérimentales. Même les notes techniques réalisées plus tard pour l'ONERA seront mathématiques, comme celles concernant les écoulements transsoniques et les ondes de choc [59].

Les différences entre Villat et Kampé de Fériet sont manifestes et pourraient, au moins partiellement, expliquer leur divergence au sein du milieu de la mécanique des fluides en France. Ces divergences se manifestent aussi dans plusieurs aspects de la vie institutionnelle de Kampé de Fériet en France.

Tout d'abord, ces divergences se manifestent dans le fait que Kampé de Fériet ne prend part ni au comité scientifique des ICAM ni au groupe des organisateurs de l'ICAM de Paris sponsorisé par l'Académie des Sciences. Dans le compte rendu du Comité International du Congrès de Paris (29 septembre 1946) [60] il y a un point concernant la désignation de deux nouveaux membres représentants de la France, suite au décès de Jouguet et du transfert de nationalité de Hahn en Suisse. Là, les deux membres nommés furent Pérès et Caquot et non pas Kampé de Fériet bien qu'il soit très connu au sein du milieu des congrès ICAM [61]. Il était un promoteur convaincu de cette vague d'internationalisation de la mécanique des fluides et condamnait la politique d'ostracisme des français à l'égard des allemands, laquelle empêchait aux français de participer aux ICAM. La preuve en est une lettre qu'il écrit à Châtelet à son retour en France après l'ICAM de Zurich :

> Le congrès de Zurich a été très réussi, le cadre d'abord était splendide, le "Poly" est un établissement d'un luxe énoncé plutôt un palais que une école : ce qui est plus curieux, le personnel semble être à "hauteur" du décor, puisque, comme mathématiciens, j'ai rencontré *nom illisible*, Weyl, Polya, Plancherel, Futter et que la liste des anciens professeurs débute par Christoffel, et continue par Schwarz, Frobenius, Dedekind, Hurwitz, Zermelo,....
> Il y avait beaucoup de monde, mais surtout germanique, les français étaient peu nombreux : Bouligand, Buhl, Jouguet, Risser, Bénard, Camichel, Barillon, Hahn, et moi (+ d'Adhémar) : 10 sur 250....

59. Ces notes se trouvent dans [Archives de l'Académie des Sciences, 61 J, Fonds Villat].
60. Document fourni par Giovanni Battimelli que j'en profite pour remercier.
61. En effet, Kampé de Fériet n'a jamais raté un congrès ICAM à partir de celui de Zurich en 1926 sauf le congrès de Cambridge en 1934 où il n'a pas participé à cause de la perte de sa femme pendant la même période.

> Surtout les grandes vedettes annoncées : Hadamard, Koenigs, Villat, s'étaient toutes excusés à la dernière minute, ce qui produit toujours mauvais effets. Mais nous nous sommes arrangés entre nous pour lire les communications des français absents : il y a eu une vingtaine de communications françaises. Lille vient certainement en tête avec trois communications : Swyngedauw, Béghin et moi. [Kampé de Fériet à Châtelet, le 28 septembre 1926 [62]]

Ainsi, la nomination de Pérès et Caquot au comité international fait ressortir un fort centralisme de Paris et un manque d'intérêt de Villat à l'égard des professeurs de mécanique des fluides des universités de province.

A cela nous pouvons ajouter le fait que le rapport d'Henri Villat sur la candidature de Kampé de Fériet en qualité de membre de l'Académie des Sciences [63] ne rend pas justice à la valeur scientifique de ce mathématicien. Long de seulement 4 pages, ce rapport passe très vite sur les travaux expérimentaux du mathématicien alors que sa contribution dans le cadre de la généralisation de la théorie de la turbulence de Taylor et von Kármán n'est guère mentionnée. Bien que de manière non détaillée, Villat s'attarde surtout sur ses travaux rigoureux du point de vue mathématique, notamment le problème de la moyenne comme un problème se ramenant à un problème de "l'Algèbre abstraite". Il mentionne les travaux de mécanique statistique comme des travaux "que les probabilistes considèrent comme un apport essentiel à leur propre domaine" et "l'équation rigoureuse que doit satisfaire la transformée de Fourier du tourbillon dans un mouvement fluide" dans le cadre de l'analyse spectrale et de l'étude de la turbulence.

En deuxième lieu, ces divergences émergent dans la faiblesse des liens scientifiques entre Kampé de Fériet et les autres professeurs de mécanique des fluides français, y compris Villat. En effet dans les publications de Kampé de Fériet la bibliographie mentionne presque exclusivement des noms étrangers ou, rarement, ceux de Wehrlé et Dedebant. Les liens avec Villat sont presque inexistants. Dans son fonds conservé à l'Académie des Sciences les seuls documents en connexion avec Villat sont ceux concernant sa candidature à la section de mécanique à l'Académie - 61 ans, plutôt tard par rapport à Villat (44 ans) même et Pérès (52 ans) - et une lettre de réponse à Villat qui lui avait proposé de rééditer l'article d'Appel sur les fonctions hypergéométriques de plusieurs variables dans son *Mémorial*.

Cependant, nous sommes loin de dire que son intégration et son influence

62. [Archives départementales du Pas-de-Calais, 81 J 1, Fonds Châtelet].
63. Document datant du 31 mai 1954 et consultable dans les archives de l'Acadèmie des Sciences, dossier de Kampé de Fériet.

au sein de la communauté scientifique française est inexistante, surtout après la seconde guerre mondiale. A titre d'exemple, nous pouvons mentionner l'influence de sa notion de moyenne dans les travaux Dubreil-Jacotin où le prix Poncelet qu'il reçoit en 1951 "pour l'ensemble de ses travaux sur la mécanique des fluides et les théories statistiques qui s'y rattachent", devant une commission formée par Borel, Cartan, Villat, de Broglie, Caquot, Pérès, Vessiot, Beghin et Roy [64].

4.4.3 Une véritable intégration dans le milieu de von Kármán

Au contraire de ce qui se passe en France, les travaux de Kampé de Fériet sont très appréciés à l'étranger, en particulier aux États-Unis. Il se lie à des personnalités autour de von Kármán dans un premier temps, et à Nobert Wiener. Ses missions aux États-Unis, financées par le ministre des Affaires Étrangères, sont très fréquentes et productives quant à ses études sur la turbulence. Il a fait des séjours réguliers à l'université de Harvard, à l'Institut of Aeronautical Sciences, au MIT et à Pasadena.

La correspondance entre Kampé de Fériet et von Kármán conservée dans les Archives de Caltech ([Archives California Institute of Technology (Caltech) , Papers of Theodore von Kármán, Box/Folder 14.47 et 14.48]) permet de reconstruire, au moins dans les grandes lignes, son rapport avec le milieu de mécanique des fluides de von Kármán aux États-Unis, un rapport qui est beaucoup plus consolidé que celui avec la "communauté" de mécanique des fluides autour de Villat. Cet ensemble d'une soixante-dizaine de lettres fait ressortir le fait que c'est von Kármán -outre les travaux français de Wehrlé et Dedebant- qui dirige l'attention de Kampé de Fériet vers la théorie de la turbulence. Sa participation à la Commission de la Turbulence Atmosphérique (1935-1940) n'est qu'une conséquence de ce nouvel intérêt. La preuve en est que von Kármán lui envoie ses travaux sur ce sujet déjà à partir de 1933 :

> "L'institut que vous dirigez vient de m'envoyer toute une série de vos travaux et de ceux de vos collaborateurs ; je tiens à vous dire sans plus tarder combien j'ai été sensible à cette aimable attention. Ces publications me seront très précieuses car les résultats qu'elles contiennent sont particulièrement importants. " [Kampé de Fériet à von Kármán, le 21 juillet 1933]

A partir de ce moment-là [65], l'échange entre les deux perdurera jusqu'à la fin des

64. CRAS (1951) t. 233 p. 1421.

65. Si la correspondance commence à partir de 1933, les deux avaient déjà eu d'autres occasions d'échanger leurs idées comme par exemple lors des congrès ICAM ou pendant l'inauguration de l'Institut d'Aérodynamique d'Aix-la Chapelle en 1929. Voir la lettre de Kampé de Fériet à von

années 1940.

Une première analyse de la correspondance montre que von Kármán manifeste un profond intérêt pour ses recherches, qui sont entre la théorie et les travaux pratiques en équipe. Par exemple, après avoir reçu une lettre de Kampé de Fériet à propos de l'avancement de ses travaux conduits lors de sa mission au Sahara avec son équipe de l'IMFL en 1939 [Kampé de Fériet 1942] [66] :

> "Nous essayons de continuer notre travail sur la Turbulence, la théorie et les recherches expérimentales sont en cours : durant l'hiver dernier, au Sahara, j'ai, avec trois de mes collaborateurs, étudié avec grand soin la couche limite de l'atmosphère ; J'ai trouvé que le profil de vitesses est en accord raisonnable avec la loi logarithmique :
>
> $$\overline{u(z)} = 5,75 u_0 \log \frac{z - z_0'}{z_0}$$
>
> mais qu'aucune des deux constantes z_0, z_0' n'est constante ; Elles dépendent tous les deux de la situation atmosphérique à grande échelle. " [67] [Kampé de Fériet à von Kármán, le 10 septembre 1940]

Il lui répond avec enthousiasme en écrivant :

> "Le problème de la couche limite dans l'atmosphère est très intéressant. Je pense que vos données recueillies dans le désert du Sahara seraient d'une grande importance. Avez-vous fait des observations sur le transport du sable dans l'air ? Nous sommes très intéressés par ce problème et nous avons construit une petite soufflerie pour une telle recherche. " [68] [von Kármán à Kampé de Fériet, le 5 octobre 1940]

Kármán, le 18 décembre 1933.

66. Nous avons parlé de ces recherches dans le troisième chapitre.

67. "We try to continue our work on the Turbulence ; theory and experimental researches are both in progress. During the last winter, in the Sahara, I have, with three of my collaborators, studied with great care the boundary layer of the atmosphere ; I found that the velocity profile is in a reasonable agreement with the logarithmic law :

$$\overline{u(z)} = 5,75 u_0 \log \frac{z - z_b}{z_0}$$

but that none of the two constant z_0, z_0' was constant ; they depend both on a large scale of the atmospheric situation."

68. "The problem of boundary layer in the atmosphere is very interesting. I think that your data collected in the Sahara Desert would be of great importance. Did you make any observations from transport of sand in the air ? We are very much interested in this problem and have contructed a small blowing wind tunnel for such research."

L'intérêt de von Kármán à l'égard des travaux de Kampé de Fériet est visible déjà auparavant, en 1937, dans une lettre de réponse à son invitation à l'IMFL :

> "Je vous remercie de votre invitation à visiter votre laboratoire . Je communiquerai avec vous dès mon arrivée en Europe. J'espère que nous pourrons organiser la visite, parce que je suis très intéressé de voir votre laboratoire et de discuter avec vous du problème de la turbulence." [69] [von Kármán à Kampé de Fériet, le 7 avril 1937]

Pour continuer, cette correspondance nous donne également des informations importantes sur les séjours aux États-Unis de Kampé de Fériet (au total cinq séjours jusqu'en 1951) et ses échanges avec le milieu de la mécanique des fluides américaine. Sa première expérience à Pasadena coïncide avec sa participation à l'ICAM de Cambridge où il présente la théorie de Wehrlé et Dedebant. Elle est décrite avec un grand enthousiasme :

> "Mon séjour à Pasadena me semble un rêve ; votre accueil très sympathique et chaleureux est inoubliable ; votre bel Institut, si plein de vie, vos bons collègues sont un ensemble attrayant. " [70] [Kampé de Fériet à von Kármán, le 18 novembre 1938]

D'autres lettres nous renseignent non seulement sur les visites de Kampé de Fériet au laboratoire de Pasadena mais aussi sur d'autres missions qu'il a effectué dans les laboratoires et les instituts hors de Pasadena, en particulier à l'Université de Michigan, au Bureau of Standards, à l'Université de Harvard, au MIT et à l'Institute of Aeronautical Sciences à New York dont était membre depuis 1937. Dans l'Institute of Aeronautical Sciences il eut l'occasion de connaître ses membres notamment Clark Millikan, Hugh Dryden, Lester Gardner, Arnold Kuethe [71] [72], avec lesquels

69. "I thank you for you invitation to visit your laboratory. I will communicate with you as soon as I arrive in Europe. I hope we can arrange the visit, because I am very much interested in seeing your laboratory and in discussing with you the problem of turbulence."

70. "My stay in Pasadena seems to me like a dream ; your very frendly and cordial reception is anforgettable ; your beautiful Institute, so full of life, your kind colleagues are an atractive whole"

71. Kampé de Fériet à l'Institut of Aeronautical Sciences, le 28 novembre 1944.

72. L'Institute of Aeronautical Sciences est un institut entre une sorte de club et une société de statut élitaire qui regroupait, à travers des rencontres périodiques, divers ingénieurs et universitaires intéressés par l'aéronautique. Lester Gardner (1876-1956), professeur d'aviation, est considéré comme l'un des fondateurs de cet institut.
Clark Millikan (1903-1966) fut professeur d'aéronautique à Caltech et directeur du Guggenheim Aeronautical Laboratory à partir de 1949. Il joue un rôle actif dans la création du Jet Propulsion Laboratory de Caltech pendant la seconde guerre mondiale.
Arnold Kuethe (1905- ?), fut un ingénieur qui, après son doctorat à Caltech en 1933, entreprit des travaux de recherche en aérodynamique et météorologie au Guggenheim Airship Institute à Akron, en Ohio. A partir de 1941, il assurera des cours à l'Université de Michigan, dans le Département d'Ingénierie Aéronautique.

il organise plusieurs rencontres, comme en témoigne plusieurs lettres.

Son important réseau de connaissances lui permettait de discuter ses idées, de participer aux conférences sur la mécanique des fluides et l'aéronautique, de connaître des laboratoires à l'avant-garde en ce qui concerne les recherches expérimentales, l'outillage scientifique et ses liens avec l'industrie. Dans ce contexte, il participait aux discussions concernant les recherches de Caltech faites pour le National Advisory Committee Aeronautics [73] et il profitait de ces séjours pour tester ses recherches théoriques dans le laboratoire de Pasadena, en collaboration avec les ingénieurs américaines de Caltech. Par exemple, en 1946, il propose à von Kármán un séjour de deux mois à Pasadena en tant que professeur invité afin de tester ses recherches théoriques dans son laboratoire en collaboration avec ses collègues :

> "Comme je vous l'ai dit lors du Congrès de Mécanique Appliquée, la " Direction des Relations Culturelles" veut me renvoyer dans une mission officielle pour trois mois aux USA. Je serait très heureux de passer la plus grande partie de ce temps, deux mois disons, au Cal.Tech ; ce serait très fructueux pour moi, j'en suis sûr ; si vous voulez je peux, en tant que professeur invité, donner quelques conférences sur la "Turbulence" et faire des recherches expérimentales avec un de vos collaborateurs, LIEPMANN [74], par exemple. Il serait simple et intéressant de tester mes formules théoriques sur l'utilisation d'un [anémomètre] à fil chaud non compensé pour la détermination de la corrélation et du spectre. " [75] [Kampé de Fériet à von Kármán, le 6 octobre 1946]

Ce séjour fut assez fructueux pour Kampé de Fériet ainsi qu'en témoigne une lettre ultérieure datée du 24 avril 1947. Là, il a aussi eu "la grande joie de voir de

73. Kampé de Fériet au conseiller culturel de l'ambassade française de New York, le 22 février 1946 [Archives California Institute of Technology (Caltech), Papers of Theodore von Kármán, Box/Folder 14.47 et 14.48].

74. Il se réfère à l'ingénieur aéronautique Hans Liepmann (1914-2009), lequel, après son doctorat à l'Université de Zurich, il rejoint von Kármán à Caltech en 1939 où il sera nommé professeur d'aéronautique et physique appliquée. A partir de 1972, il deviendra directeur du Guggenheim Aeronautical Laboratory. Ses recherches couvrent un ample spectre de sujets qui concernent la turbulence, la dynamique des gaz et les fluides visqueux compressibles.

75. "As I told you during the Congress of Applied Mechanics, the "French Direction des Relations Culturelles" want to send me again in an official Mission for trhree months in the U.S.A. I would be very glad to spend the greatest part of this time, two months say, at the Cal.Tech. ; it would be very fruitful for me, I am sure ; if you want I can, as visiting professor, give some lectures on "Turbulence" et do some experimental researches with one of your collaborators, LIEPMANN for instance. It would be easy and interesting to test my theoretical formulas on the use of a non compensated hot-wire for the determination of correlation and spectrum."

vrais mathématiciens BOHNENBLUST et DEPRIMA s'intéresser à ses travaux [76].

Avec von Kármán, Kampé de Fériet échangeait des lettres aussi avec Norbert Wiener, professeur de mathématiques au MIT. Comme c'est le cas de Pasadena, le MIT était une des étapes toujours présentes dans les programmes des missions de Kampé de Fériet. Leurs arguments de discussion étaient surtout les mouvement browniens, au moins au début de leur correspondance [77]. Par exemple, dans une lettre du 6 mai 1939, il explique les différences entre sa première note sur le spectre de la turbulence homogène -que nous avons vu être encore liée aux idées de Wehrlé et Dedebant- et sa nouvelle approche contenue dans [Kampé de Fériet 1939a] :

> "Je suis heureux de vous envoyer par le même courrier une courte note que j'ai écrite sur le spectre de la turbulence au cours des dernières semaines ; j'ai tracé une nouvelle piste absolument différente de celle dont je vous ai parlé lors du congrès de Cambridge ; j'ai écrit un ouvrage important sur ce sujet, qui paraîtra dans deux semaines ; je vous l'enverrai dès qu'il paraîtra, j'espère que vous avez reçu toutes les publications que je vous ai envoyées l'automne dernier ; je serai très heureux si vous avez la possibilité de m'envoyer la note dont vous m'avez dit qu'elle serait très bientôt publiée sur votre théorie très intéressante du pur chaos. J'ai découvert récemment que vous avez publié des recherches très intéressantes sur le mouvement brownien dans l'Acta Mathematica et dans le Matematische Zeitschrift et avec M. Mahler dans le Journal Maths et Physics du MIT. " [Kampé de Fériet à Wiener, le 6 mai 1939] [78]

76. Henri Frederic Bohnenblust (1906-2000) fut un mathématicien d'origine suisse-américaine, professeur à Caltech depuis 1946. Ses thèmes de recherches concernent l'analyse fonctionnelle. Charles Deprima est un mathématicien élève de Richard Courant et professeur à Caltech. Il est spécialiste dans la théorie des équations integro-différentielles.

77. Plus tard, leur objet de discussion sera la théorie de l'information, un sujet de recherche auquel Kampé de Fériet commencera à s'intéresser après la guerre grâce aux travaux féconds de Wiener dont ce dernier peut être considéré comme un pionnier de ce domaine.

78. "I am glad to send you by the same mail a short Note I wrote on the spectrum of turbulence in the last few weeks ; I have struck a new trail, absolutely different from the one I spoke with you of during the Congress at Cambridge ; I have written an important work of this subject, which will appear in two weeks ; I will send you it as soon as it appears. I am hoping thant you have receveid all the publications I sent you in the last Fall ; I will be very glad if you have the possibility to send me the paper you told me would be published very soon on your very interesting theory of a pure Chaos. I have discovered recently that you have published very interesting researches on the brownian Motion on the Acta Mathematica and in the Matematische Zeitschrift and with MR Mahler in the Journal Math. and Physics of the MIT." [Institute Archives and Special Collections MIT Libraries, Norbert Wiener Papers, Box 3 Folder 54].

Quoi qu'il en soit, ses premiers séjours aux États-Unis constitueront une rampe de lancement dans le milieu de la mécanique des fluides américaine de l'après guerre où il deviendra un personnage incontournable à partir des années 1950. Ses séjours seront consacrés - outre à des collaborations scientifiques comme celles avec Garret Birkhoff et Norbert Wiener- à donner des cours sur la turbulence, la mécanique statistique des milieux continus et l'analyse harmonique généralisée. Il donnera des enseignements semestriels à l'Université du Maryland (1950/1951 et 1951/1952), des leçons à la Naval Ordnance Laboratory de Washington (1949), et dans d'autres universités américaines.

De plus il recevra à Lille un étudiant de l'Université d'Illinois, Marie Zbigniew Krzywoblocki (1904-1978). Cet étudiant d'origine polonaise avait fait un séjour de 6 mois à l'IMFL où il avait essayé d'étendre les résultats de Kampé de Fériet au cas d'un fluide turbulent compressible. Il publie son travail dans les *Publications du Ministère de l'Air* en 1956. A son retour aux États-Unis, il deviendra un professeur d'ingénierie mécanique dans le College of Engineering en Michigan.

4.4.4 Une profonde admiration chez les probabilistes français

Malgré les liens très faibles avec les mécaniciens français, Kampé de Fériet semble très proche de la communauté des probabilistes de l'époque. Il participe aux séminaires de calcul de probabilité de Maurice Fréchet de l'IHP [79], où il tient les Français au courant de tout ce qu'il avait appris pendant ses séjours aux États-Unis, grâce aussi à ses contacts avec des mathématiciens comme Richard von Mises, nommé à la chaire Gordon-McKay d'aérodynamique et de mathématiques appliquées de l'université Harvard en 1944. En même temps, il renseignait les mathématiciens américains de travaux des probabilistes français. Par exemple, dans une lettre à Fréchet, il écrit :

> Je suis rentré avant-hier des États-Unis où au cours de ma mission, qui a duré deux mois, j'ai visité Harvard University, le MIT, le Caltech et Ann Arbor.
> Pendant la semaine que j'ai passée à Cambridge, j'ai eu plusieurs entretiens de longue durée avec Norbert Wiener ; ses récents travaux, très importants, m'ont vivement intéressé.
> J'ai eu l'occasion de lui montrer votre Mémoire sur le principe ergodique, et les fonctions asymptotiques presque périodiques, qu'il ne connaissait pas ; il a été très étonné de votre résultat ;il pense que les théorèmes ergodiques doivent s'appliquer à des classes beaucoup plus

79. Kampé de Fériet parle de l'un des ces séminaires à Loeve. Voir une lettre datée du 19 juin 1946 [Archives de l'Académie des Sciences, 67 J, Fonds Fréchet].

> générales de fonctions que celles que vous envisagez. A la fin de nos entretiens, l'opinion de Norbert Wiener était que ce sont vos conditions d'égale continuité qui rétrécissent le champ des fonctions possibles. Au cours de ma mission, j'ai eu l'occasion de rencontrer d'éminents probabilistes, en particulier Richard Von Mises ; j'ai correspondu avec Willy Feller, Kac et Wald. A un de mes prochains voyages à Paris, j'espère avoir le plaisir de pouvoir vous parler de tout ce que j'ai appris. Nous pourrons peut-être envisager un exposé à votre séminaire au cours duquel je résumerais certaines parties de l'abondante documentation que j'ai rapportée. [Kampé de Fériet à Fréchet, lettre datée du 28 mars 1946 [80]].

Les liens entre Kampé de Fériet et les probabilistes français se manifestent aussi lorsqu'il demande à Fréchet un étudiant pour l'aider dans l'avancement de ses recherches [81].

De plus Paul Lévy montrait une grande admiration pour Kampé de Fériet, qui transparaît dans certaines lettres à Fréchet. Dans l'introduction de son chef-d'œuvre, *Les processus stochastiques et mouvement brownien*, le nom de Kampé de Fériet apparaît parmi ceux qui ont fait de grands progrès sur ce sujet entre 1934 et 1939. En outre, sa bibliographie contient bien cinq publications du mathématicien lillois, y compris [Kampé de Fériet 1939a]. Comme lui, Lévy avait toujours étudié les connexions entre les mathématiques et la physique, et c'est à travers cette connexion qu'il est arrivé à la probabilité, au moyen d'une approche qui plaisait plus aux physiciens qu'aux mathématiciens comme Borel et Hadamard [Barbut et. al. 2014, 18]. En outre, toujours comme Kampé de Fériet, il était lié à la communauté scientifique américaine grâce aussi à ses séjours et à son étudiant Michel Loève, "qui avait porté la bonne parole de Levy" [Schwartz 1988, 15] au-delà de l'océan et qui avait donné une grande contribution à la probabilité française, en formant Jacques Neveu et Paul-André Meyer.

En résumé, les recherches de Kampé de Fériet forment une contribution remarquable à la théorie de la turbulence de l'époque et sont très appréciées par les probabilistes du temps. Elles font partie du même mouvement qui implique les théories de Taylor en Angleterre, de Prandtl en Allemagne et de von Kármán et Dryden aux États-Unis. Il joue un rôle presque paradoxal : dans ce contexte, il représente la France mais, en même temps, il semble qu'il ne fasse pas partie de la communauté française !

80. [Archives de l'Académie des Sciences, 67 J, Fonds Fréchet].
81. Kampé de Fériet à Fréchet, lettre datée du 6 novembre 1944 [Archives de l'ONERA Lille, fonds Kampé de Fériet].

4.5 Conclusions

Dans ce chapitre nous avons montré comment Villat - à travers le miroir des premiers travaux d'hydrodynamique entre 1929 et 1933 de Kampé de Fériet- et lui même- avec ses travaux visant à donner une approche probabiliste à la théorie de la turbulence - représentent deux façons différentes de mathématiser la mécanique des fluides pendant l'entre-deux-guerres en France. L'un étudie les solutions exactes et les fluides parfaits à l'aide de l'analyse alors que l'autre travaille sur les solutions aléatoires et les fluides turbulents à l'aide du calcul des probabilités et, en même temps, il participe activement aux travaux expérimentaux de son équipe à l'IMFL. Leur divergence est explicite, ce qui nous a incité à comprendre la position de Kampé de Fériet au sein du milieu de la mécanique des fluides française. Malgré cela, la valeur internationale des travaux de Kampé de Fériet est reconnue par les probabilistes français et les mécaniciens des fluides autour de von Kármán. A ce propos nous avons essayé de reconstruire son insertion dans la communauté scientifique américaine à partir de sa riche correspondance avec von Kármán et Norbert Wiener.

Nous pouvons conclure ce chapitre en faisant d'abord un bilan de son interprétation déterministe "à la française" proche de Villat et puis de son interprétation probabiliste "as we like it" de la mécanique des fluides pendant l'entre-deux-guerres.

4.5.1 "se borner à des curiosités mathématiques sous le nom de langage hydrodynamique"

Pendant l'entre-deux-guerres, l'approche mathématique "à la française" à la mécanique des fluides de Villat fut au cœur d'un débat plus général entre mathématiciens et physiciens à propos de l'utilité des mathématiques dans les domaines de la physique et de l'ingénierie, un débat qui existait déjà avant la première guerre mondiale si nous pensons par exemple à la formation en mathématiques des polytechniciens [Aubin 2006, 21]. A titre d'exemple, afin de comprendre l'importance de ce débat nous introduirons le cas de Robert Adhémar. Cet ingénieur et mathématicien avait consacré un article sur ce "conflit latent entre les physiciens et les mathématiciens " [Adhémar 1921]. Dans cet article, l'auteur essaye de nuancer la forte critique lancée par le physicien Henri Bouasse (1866-1953) [82] à l'égard des mathématiciens, contenue dans la préface de son livre sur la *Résistance des*

82. Le cas de Bouasse est un cas particulier ainsi que ses critiques. Son exemple ne permet donc pas d'expliquer de façon exhaustive la question de la manière dont les physiciens voient les mathématiciens. Cependant, ses critiques deviennent un élément utile pour soulever l'importance de cette question, encore ouverte et peu claire.

Matériaux (1920). Tout d'abord, la critique de Bouasse s'adresse aux systèmes pédagogiques en affirmant que "nos licenciés ès sciences mathématiques sont incapables de faire une application numérique ". " C'est comme une perversion d'identifier la Mécanique à l'Analyse : la "Mécanique est le premier chapitre de la Physique". Ensuite, il montre la conviction de Bouasse selon laquelle " guidé par l'interprétation des phénomènes réels, le physicien peut se permettre de manier l'outil mathématique avec des hardiesses provisoirement interdites au géomètre". "Peu importe une parfaite rigueur s'il s'agit, finalement, de comparer une formule à une expérience". Face à cette polémique, d'Adhémar est plus diplomate que Bouasse et défend la position des mathématiciens. Cependant il ajoute que "la Guerre nous a donné une "douche" de réalisme et je conclurai : moins de cloisons étanches entre ces trois enseignements : Analyse, Mécanique et Physique ! " [Adhémar 1921, 272-275].

Les critiques de Bouasse adressées, au moins implicitement, à l'approche fortement mathématique de Villat, peuvent-elle s'adresser à Kampé de Fériet ? Les premiers travaux d'hydrodynamique sur le mouvement d'un fluide parfait autour d'un obstacle ne furent pas exemptes de critiques, soulevées par exemple par un autre physicien, Marcel Brillouin, dans une lettre à Villat le 9 juin 1929 [83] :

> "j'ai vu plusieurs fois Kampé de Fériet. J'espère que lui aussi se mettra à l'oeuvre sur ces questions délicates ; au moins jusqu'à présent il me ferait l'impression de se borner à des curiosités mathématiques sous le nom et le langage hydrodynamique, au lieu de chercher, comme vous l'avez entrepris, à forger l'instrument mathématique nécessaire pour approcher peu peu le problème physique de l'hydrodynamique"

En effet, nous avons vu que ses premiers travaux n'apportent pas des éléments nouveaux mais se proposent de donner une formulation mathématique plus élégante à des concepts déjà étudiés par Brillouin. Les travaux des années suivantes (1930-1933) sur les fluides visqueux non turbulents découvrent de nouveaux résultats en étendant les classes de solutions exactes des équations de Navier-Stokes. Cependant, il s'agit encore de travaux "trop mathématiques" dédiés aux solutions exactes, et qui sont appréciés, développés et inspirés principalement par les mathématiciens.

4.5.2 *"Que ces probabilités sont utiles !"*

A partir de 1933, la situation change : la polémique des physiciens à l'égard des mathématiciens peut-elle s'adresser encore à Kampé de Fériet ou bien, jusqu'à quel point les probabilité sont-elles utiles dans les domaines de la physique et de

83. Fond Villat 61 J

l'ingénierie ?

Une réflexion sur l'utilité du calcul des probabilités se trouve dans *Hasard et Probabilité* (1945) (cf. annexe F), dans lequel, à travers un ex-cursus historique sur les probabilités, Kampé de Fériet essaye de répondre à la question suivante :

> " Le Hasard, postulé par les applications du Calcul Abstraits des probabilités au monde de l'expérience, a-t-il le même sens pour le mécanisme déterministe qui a régné en maître de Newton à Poincaré et pour la mécanique statistique que nous proposent les adeptes de la Physique Quantique et de la Mécanique ondulatoire ?" [Kampé de Fériet 1945, 1]

Là, il montre la manière dont les probabilités occupent progressivement une place importante dans les diverses expériences de la physique contemporaine et plus en général dans les divers champs de la science (astronomie, biologie, psychologie). *Au contraire de Villat qui défend le caractère mathématique de la mécanique des fluides, ses applications du calcul des probabilités se fondent sur la conviction que "c'est pour interpréter des faits expérimentaux, en apparence contradictoires, et non par dilettantisme, que ces idées nouvelles et surprenantes ont dû être introduites."* [Kampé de Fériet 1945]. Voilà, ce que nous avons essayé de montrer dans ce chapitre.

D'après lui, le calcul des probabilités n'a pas la priorité au sein de ses recherches ; c'est un outil "utile" qui lui permet d'aborder des questions de nature plus appliquée, comme la mécanique des fluides. Ses travaux sur le spectre de la turbulence, l'analyse du concept du moyenne et, plus tard, ses recherches sur le théorème ergodique montrent cet aspect. En 1964, pendant une conférence à Washington, il met en évidence son statut de spécialiste de mathématiques appliquées :

> " La recherche d'un modèle théorique pour le mouvement brownien d'une particule et pour l'écoulement turbulent d'un fluide a conduit assez naturellement à la définition d'intégrales aléatoires dans le cadre des équations différentielles ordinaires ou à dérivées partielles respectivement, dans ce dernier domaine une extension à la mécanique statistique des systèmes holonomiques dans les milieux continus a donné une orientation bien définie à l'entier développement. C'est le seul prétexte qu'un spécialiste de mathématiques appliquées (qui a consacré une large partie de sa recherche à la mécanique des fluides) peut utiliser dans la discussion de ces problèmes mathématiques, qui deviennent toujours plus abstraits chaque jours. " [Kampé de Fériet 1965, 227]

Simultanément, ses recherches mathématiques de l'époque, comme l'étude des intégrales stochastiques dans les équations différentielles, donnent une impulsion importante au domaine de la physique, notamment la mécanique statistique. A partir des années 1950, ses recherches sur la turbulence déboucheront dans la mécanique statistique des milieux continus où on trouve un grand nombre de recherches effectuées en collaboration avec Garrett Birkhoff. Comme nous avons déjà remarqué avec sa notion de moyenne statistique, sa conviction deviendra de plus en plus explicite que seulement la mécanique statistique peut clarifier la turbulence et son caractère aléatoire, en étendant le point de vue de Gibbs à la mécanique des fluides. Là, la définition de fonction aléatoire au sens de Kolmogorov sera remplacée progressivement par la définition de fonction aléatoire que Norbert Wiener avait introduite dans ses recherches sur la théorie du mouvement brownien, une définition qui semble s'introduire plus naturellement dans la mécanique statistique [Blanc-Lapierre et Fortet 1953, 572]. Un exposé détaillé de la contribution en calcul des probabilités et en mécanique statistique se trouve dans l'article de Jean Delporte, un élève de Kampé de Fériet qui a préparé une thèse intitulée *Fonctions aléatoires presque sûrement continues sur un intervalle fermé* (1963) [84], un an avant sa retraite.

Les espoirs de Kampé de Fériet confiés au calcul des probabilité ne cèlent pas, cependant, les ruptures à l'intérieur de ce sous-domaine probabiliste de la mécanique des fluides. Ces ruptures sont aussi données par le fait que le calcul des probabilités - sans oublier les grands pas en avant au niveau scientifique et institutionnel de l'entre-deux-guerres- n'acquiert une place affirmée comme domaine des sciences mathématiques à part entière qu'à partir de la deuxième moitié du xx^{e} siècle [Leloup 2009, 349]. Après la guerre, malgré les énormes progrès donnés par l'arrivée des ordinateurs et l'introduction des attracteurs grâce aussi aux travaux de David Ruelle et Florins Takens des années 1970 [85], l'approche probabiliste à la turbulence - et plus en général la théorie de la turbulence développée - laisse encore aujourd'hui des problèmes ouverts car "on ne dispose à ce jour d'aucune théorie complète du phénomène" [Farge 1992, 212]. Certaines réflexions sur cette problématique se trouvent, par exemple, dans l'article de Marie Farge et Étienne Guyon. Une de ces réflexions actuelle sur ce problème est la suivante [Farge et Guyon 1999, 18] :

> "L'approche probabiliste statistique est peut-être trop abstraite et il est difficile de la déterminer dans la plupart des cas. Afin de comparer

84. Une thèse qui porte sur les méthodes et les conditions pour construire sur un intervalle fermé des fonctions aléatoires presque surement continues qui possèdent une covariance donnée.

85. Sur l'approche de Ruelle et Takens à la théorie de la turbulence et leur notion d'attracteur étrange voir [Aubin 1998].

ses prédictions avec des expériences de laboratoire ou numériques, il faut s'assurer que les moyennes d'ensemble convergent vers des moyennes temporelles ou spatiales et satisfont donc l'hypothèse ergodique. [...] Il existe deux types d'approche expérimentale, chacun ayant ses propres limites. Premièrement, les expériences en laboratoire, où il est facile de mesurer une ou deux (ou même plus) corrélations ponctuelles et d'accumuler des statistiques à long terme. Deuxièmement, les expériences numériques où il est facile de mesurer l'évolution temporelle et la distribution spatiale des champs de vitesse et de vorticité pour une réalisation du fluide donnée, mais où il est hors de portée de calcul pour calculer des moyennes d'ensemble. Les deux approches sont en effet complémentaires, les expériences de laboratoire permettent d'effectuer des analyses statistiques, tandis que les expériences numériques permettent d'effectuer des analyses dynamiques. Malheureusement, ces deux approches sont également duales, et il est donc difficile de les comparer. [...] Une grande confusion dans notre compréhension de la turbulence est due au fait que nous essayons de récupérer un aperçu dynamique à partir de moyennes statistiques et des informations statistiques d'une seule réalisation de flux. De plus, l'analyse statistique s'appuie sur la représentation de Fourier, tandis que l'analyse dynamique s'appuie sur la représentation spatiale. Nous devons être conscients que nous ne pouvons réconcilier ces deux représentations, à moins d'utiliser des fonctions de base qui sont localisées à la fois dans l'espace physique et dans l'espace des nombres d'onde, tels que les ondelettes ou les paquets d'ondelettes." [86]

86. "The statistical probabilistic approach may be too abstract and its liks with experimental observations are difficult to ascertain in most cases. In order to compare its predictions with laboratory or numerical experiments, one has to guarantee that ensemble averages converge to time or space averages, and therefore satisfy the ergodic hypothesis. [...] There are two kinds of experimental approach, each having its own limitations. First, laboratory experiments, where it is easy to mesure one or two (or even more) point correlations and accumulate long time statistics. Secondly, numerical experiments where it easy to measure the time evolution and spatial distribution of velocity and vorticity fields for one given flow realization, but where it is out of computational reach to compute large ensemble averages. The two approaches are in fact complementary, laboratory experiments allow us to perform statistical analysis, while numerical experiments allow us to perform dynamical analysis. Unfortunately, these two approaches are also dual, and it is therefore difficult to compare them. [...] A lot of confusion in our undestanding of turbulence is due to fact that we try to retrieve dynamical insight out of statistical averages and statistical information out of only one flow realization. Moreover, the statiscal analysis relies on the Fourier representation, while the dynamical analysis relies on the spatial representation. We mus be aware that we cannot reconcilie these two representations, unless we use basic functions which are localized in both physical space and wavenumber space, such as wavelets or wavelet packets. "[Farge et Guyon 1999, 18]

Villat et Kampé de Fériet marquent deux trajectoires indiquant deux spécialistes distincts des mathématiques appliquées mais en même temps elles ressentent profondément les expériences de la première guerre mondiale et la conséquente oscillation entre la spéculation théorique et l'utilitarisme des mathématiques qui dérivent respectivement de la rupture ou la continuité avec la guerre. Cependant, ces deux trajectoires ne sont pas les seules pendant cette période. Il serait intéressant de connaître d'autres types de trajectoires individuelles avec des approches mathématiques de nature différente, comme celle de Joseph Pérès et ses calculs analogiques appliqués à l'hydrodynamique par exemple. Dans ce contexte, Pérès n'étudie ni les solutions exactes des problèmes de mécanique des fluides, ni les solutions aléatoires mais les solutions numériques afin " d'apporter aux techniciens des résultats immédiatement utilisables" [87]. Grâce à la collaboration avec le physicien Lucien Malavard, il a lié l'analyse théorique aux réalisations analogiques expérimentales. Ce profil diffère de celui de Kampé de Fériet comme de celui de Villat. Contrairement à Villat, ses recherches étaient en contact avec les aspects expérimentaux de la mécanique des fluides. Contrairement à Kampé de Fériet, il se servait de la collaboration d'un physicien pour appliquer ses recherches théoriques alors que la recherche théorique Kampé de Fériet, sauf quelques travaux, semble être presque indépendante de sa recherche expérimentale effectuée en équipe avec l'IMFL. L'idée d'utilité chez Pérès semble être différente de celle de Kampé de Fériet, fondée sur l'espoir que la probabilité puisse interpréter les faits expérimentaux dans le futur plutôt que de se focaliser sur une application immédiate des ses résultats. Kampé de Fériet, Villat et Pérès ont donc une idée d'applicabilité des mathématiques différente, ce qui montre, à travers le cas de la mécanique des fluides, un paysage mathématique français très diversifié et très intéressant.

87. A propos de ses travaux, voir sa *Notice* (1942) consultable dans les Archives de l'Académie des Sciences. La citation se trouve à la page 22.

Chapitre 5

La mécanique des fluides entre 1940 et 1944 : le repli de l'IMFL à Toulouse

> C'est à Péchestier que nous vivons, par la radio, les derniers soubresauts de la défaite et la demande d'armistice qui intervient le 24 juin.
>
> Maurice Dubois (1940)

La seconde guerre mondiale a eu un impact différent sur les savants par rapport aux effets de la première guerre mondiale sur les scientifiques. Si pendant les années 1914-1918 il y a eu - comme nous avons vu dans le premier chapitre - une mobilisation très active dans les diverses institutions militaires françaises, ici les réactions à la guerre sont différentes. En effet, suite à la déclaration de la guerre du 3 septembre 1939, l'occupation allemande, d'abord du Nord de la France (mai-juin 1940) et ensuite de toute la nation (à partir de Novembre 1942) avait empêché toute forme possible de mobilisation scientifique contre eux. Les conséquences de l'Occupation furent différentes. D'un côté, certains scientifiques furent prisonniers de guerre dans des Oflags où ils effectuèrent des recherches pour l'occupant. C'est le cas par exemple de Roger Apéry, Jean Favard, Jean Kuntzmann, Jean Leray, Robert Mazet, Bernard d'Orgeval, Henri Pailloux, Christian Pauc, Frédéric Roger, Jean Ville, René Valiron, Bernard Gregory, René-Jean Schiltz, Jean Mousel, Gaston Julia [1] etc. De l'autre côté, d'autres scientifiques moururent

1. Dans ce contexte, il y a parfois des formes explicites de collaboration avec l'occupant. A Gaston Julia, par exemple, seront reprochés plusieurs faits qu'il devra expliquer face à une commission d'épuration après la libération. Professeur à la Faculté des sciences de Paris ainsi qu'à

en déportation comme le physicien Georges Bruhat et le probabiliste Wolfgang Doeblin, alors que d'autres ont poursuivi leurs travaux en clandestinité comme par exemple Paul Lévy [Locker 2001].

En histoire des sciences (et donc en histoire des mathématiques), les études liées à la période de la seconde guerre mondiale sont presque absentes si l'on compare à celles centrées sur la première guerre mondiale. Derrière ce fait il y a plusieurs raisons, y compris la pauvreté des sources secondaires et des sources primaires fiables (il ne s'agit dans certains cas que des souvenirs où des sources repérées de manière non critique). Ce problème devient plus accentué au moment où le savant a entrepris des formes de collaboration avec l'ennemi [2].

Dans ce chapitre nous soulèverons quelques questions à propos de ce qu'il se passe dans le milieu de la mécanique des fluides pendant le régime de Vichy [3], en

l'École polytechnique, repliée à Lyon pendant le régime de Vichy, il a joué un rôle académique assez influent, en contact régulier avec les mathématiciens allemands Harald Geppert et Helmut Hasse et en tant que membre du comité de rédaction du Zentralblatt für Mathematik und ihre Grenzgebiete jusqu'en 1944 où il recrutait des recenseurs français détenus dans les Oflags (Mazet, Leray, Pailloux). A propos de cet aspect de Julia voir par exemple [Burrin 1997].

2. Si la bibliographie sur le cas français est assez pauvre en histoire des sciences, il ne faut pas néanmoins négliger certaines contributions. Par exemple, sur les mathématiciens français prisonniers de guerre dans les Oflags, il y a des études en cours effectuées par Christophe Eckes. Pendant l'année 2016-2017, il a organisé un séminaire qui recueille les recherches sur ce sujet sous le titre *Les trajectoires de mathématiciens français entre les années 1930 et l'immédiat après-guerre. Perspectives globales et études de cas* http://poincare.univ-lorraine.fr/http ://poincare.univ-lorraine.fr/fr/les-trajectoires-de-mathematiciens-francais-entre-les-annees-1930-et-limmediat-apres-guerre. En parallèle, Marie-Thérèse Pourprix s'est occupée des scientifiques lillois pendant la seconde guerre mondiale http://asa3.univ-lille1.fr/spip/ASA_histoire/mathematiques/mathematiques-6.htm, où on trouve le cas de Robert Mazet (1903-1991), recteur de l' Oflags IV D puis du Stalag I A et celui de René-Jean Schiltz (1917-1993), physicien à Lille de 1947 à 1977, fondateur du Laboratoire de Molécule diatomiques (LMD) et prisonnier dans les Stalag III A et Stalag I A. En ce qui concerne le milieu parisien, le cas de l'arrêt de Borel et ses collègues est étudié par Laurent Mazliak et Glenn Shafer [Mazliak et Shafer 2011] alors que Michèle Audin s'est consacré à la situation des publications pendant l'Occupation [Audin 2009b]. Sur Jean Leray voir [Siegmund-Schultze 2000]. Au contraire du cas français, celui allemand est plus étudié. Voir par exemple les travaux de Reinhard Siegmund-Schultze pour les mathématiques sous le troisième Reich [Siegmund-Schultze 2009b].

3. Une étude dans cette direction a été déjà effectuée par l'historien des sciences Florian Schmaltz (Université de Frankfurt), qui a présenté ses résultats lors du séminaire organisé en 2011/2012 à l' EHESS par Claudine Fontanon et Irina Gouzevitch, *Les ingénieurs civils et la circulation des savoirs technico-scientifiques en Europe, XIXe-XXe siècles : mobilités, échanges, confrontations, hybridations*. D'après ce qu'on lit dans les Annuaires de l' EHESS, sa communication *Aeronautical Research under Nazi Occupation in France (1940-1944)* montre "une dimension peu connue de l'occupation nazie à Paris : les échanges scientifiques entre ingénieurs de l'aéronautique parisiens et le

se focalisant sur le cas de l'IMFL. Lorsque la guerre éclate, l'IMFL et les autres instituts de mécanique des fluides faisaient partie du Groupement Français pour le Développement des Recherches Aéronautiques (G.R.A), fondé en 1938 et qui avait prise en charge toute la recherche aéronautique sauf l'enseignement. Afin de gérer la recherche pendant le conflit, cet organisme créera un Comité d'Aérodynamique comprenant des personnalités du G.R.A, des diverses institutions aéronautiques sous le ministre de l'Air et quelques professeurs de mécanique des fluides.

En ce qui concerne le pôle lillois, les cours et les recherches en mécanique des fluides furent assurés pendant la rentrée en octobre 1939 et se poursuivirent durant tout l'hiver et le printemps. A partir de mai 1940, la situation devint de plus en plus critique et le 16 mai 1940 le G.R.A ordonna au personnel de l'Institut de quitter Lille et de rejoindre Orléans où le G.R.A avait établi un lieu de repli. Ainsi, sur ordre écrit du ministre de l'Air, le 17 mai le personnel évacua en essayant de ramener tous les matériels possibles : le directeur et les plus âgés en voiture, les autres en vélo. Vers la moitié de juin, le personnel s'installa à Toulouse, plus précisément au Château de Péchestier (commune de Quint, près de la route de Castres) où une bonne partie des membres de l'institut et Kampé de Fériet vivaient en communauté [Figure 5.1a]. A une dizaine de kilomètres du Château, ils construisirent un laboratoire dans une chapelle, derrière l'Institut Électrotechnique de Charles Camichel, proche du canal du Midi (26, rue Riquet, Toulouse) [Figure 5.1b]. D'après les rapports d'activité de l'IMFL et d'autres documents, les recherches de mécanique des fluides de l'IMFL, guidées par Kampé de Fériet, semblent être poursuivies en clandestinité grâce aussi à la réalisation d'une soufflerie en bois de 1,20 mètres de diamètre, réalisée dans une chapelle avec des moyens assez limités. A l'époque, cette soufflerie était considérée comme l'une des moins turbulentes en France. En particulier, Kampé de Fériet souligne cette situation de clandestinité dans une lettre envoyée à l'Institute of the Aeronautical Sciences, le 28 novembre 1944 :

> "Comme vous le savez, j'ai fui Lille pour Toulouse avec tous mes collaborateurs pendant l'invasion allemande ; nous y avons été tranquilles pendant deux ans et avons pu poursuivre mes recherches sur la turbulence.
> À partir du 11 novembre 1942, il est devenu très dangereux de mener des recherches en aéronautique sans l'accord des autorités allemandes ; mais, par chance, notre laboratoire était caché dans une ancienne église, et les Allemands ne nous ont jamais pris ; la soufflerie était dans le

laboratoire aérodynamique de Göttingen en Allemagne" [Fontanon et Gouzévitch 2012–01–01]. Au delà de ses résultats et toujours en restant dans la sphère de l'histoire des sciences et de la mécanique des fluides française, les travaux secondaires sur ce sujet sont assez rares.

> chœur et l'anémomètre à fils chauds à la place de l'orgue ; peut-être qu'un jour je vous enverrais des photos de l'installation ! Toulouse était remplie d'Allemands, mais aucun n'a eu l'idée de venir voir ce que nous faisions dans ce vieux bâtiment.
> Lorsque les Allemands ont quitté Toulouse (le 19 août 1944) ils ont incendié le quartier ; toutes les maisons du quartier ont été réduites en cendres ; mais notre vieille église a fièrement résisté à l'incendie et, devinez-quoi, notre laboratoire n'a pas été égratigné et est toujours fonctionnel au milieu des ruines" [4].

Ainsi, le personnel de l'IMFL restera à Toulouse au moins jusqu'en 1945 alors que les autres professeurs et étudiants des diverses Facultés de Lille retournèrent dans le Nord dès le 23 juin 1940 après un bref repli au Touquet-Paris-Plage [5].

Le chapitre est structuré en trois sections. Dans la première section nous introduirons le comité d'Aéronautique, en essayant de comprendre son rôle pendant la guerre. Ensuite, la deuxième section se penchera sur l'IMFL et son repli à Toulouse. Là, en se basant sur les sources primaires repérées, nous montrerons les efforts de son personnel dans la continuation de leurs travaux, les difficultés à dépasser dues au manque des moyens, et la réalisation de la soufflerie en bois dans la chapelle. Enfin, la dernière section se focalisera sur l'un des étudiants de Kampé de Fériet, le physicien Naftali Frenkiel. Nous verrons que si le mathématicien Ratib Berker, en Turquie, conserve l'héritage de son maître sur les travaux sur les fluides visqueux, le physicien Naftali Frenkiel fera la même chose par rapport à ses travaux sur la turbulence, une fois arrivé aux États-Unis après la guerre. Là, il deviendra un spécialiste de la théorie de la turbulence au niveau international ainsi que l'un des fondateurs de la communauté américaine de mécanique des fluides grâce aussi à la création et l'édition du journal *Physics of Fluids* en 1958. Sa carrière américaine est assez connue alors qu'on ne connaît presque rien sur la première phase de sa vie scientifique en Belgique et en France. Pendant cette première période, il s'est formé à Gand, il a travaillé pour le Service Aéronautique Belge, et il est ensuite entré à l'IMFL dans le but de faire une thèse sous la direction de Kampé de Fériet. D'origine juive, son travail en clandestinité fait ressortir non seulement la grande valeur scientifique de ses recherches sur la turbulence mais aussi l'ensemble des difficultés qui impose le fait d'être caché de l'ennemi. En 1943, il n'échappera pas

4. [Archives de l'ONERA Lille, Fonds Kampé de Fériet].

5. Le personnel rentré à Lille en juin 1940 a concentré tous ses efforts pour faire repartir l'Université malgré toutes les difficultés et les anomalies procurées par la domination nazie. Les Instituts de Géologie et d'Électromécanique étaient occupés et l'Institut radiotechnique voit son matériel dispersé ; le nombre d'étudiants était réduit à 415 à la Faculté des Sciences, avec un total de 1689 dans toute l'Université de Lille. Sur la situation de la Faculté des Sciences de Lille pendant l'occupation voir les Annales de l'Université conservées dans les Archives de l'ASA.

aux autorités allemandes et sera déporté à Auschwitz. Libéré en 1945, il montrera immédiatement une forte et émouvante volonté de reprendre ses recherches, en partant de sa thèse qu'il soutiendra l'année plus tard.

Ce chapitre se fonde principalement sur le point de vue des acteurs sans avoir forcement du recul, et il ne traite pas de manière exhaustive ce sujet à cause de la pauvreté des sources primaires. Cependant, il permet de soulever quelques questions intéressantes qui pourraient donner des éléments de réflexion pour les travaux futurs. Sa réalisation se fonde sur les documents conservés aux Archives de l'ONERA Lille. Tout d'abord, nous avons consulté les rapports du comité d'Aéronautique pour avoir un contexte général impliquant tous les pôles de mécanique des fluides. Ensuite, pour reconstruire l'activité de l'IMFL pendant son repli, nous avons analysé les rapports de l'Institut sur l'état de leurs études ainsi que les témoignages écrits donnés par Maurice Dubois, un des collaborateurs de l'IMFL qui a vécu cette expérience [6]. Enfin, pour ce qui concerne Frenkiel, nous nous sommes adressés à l'ensemble des travaux (publiés ou non après la guerre) et à ses documents et lettres personnels. En outre, les Annales de l'Université de Lille conservées dans les Archives de l'ASA nous ont permis de donner des éléments complémentaires relatifs au paysage lillois au moment de l'exode de l'IMFL.

6. Maurice Dubois (1921-?) entre à l'IMFL en 1937, après une formation à l'École Professionnelle des Industries Lillois (EPIL). Assistent de Rollin et dessinateur, il collabore avec lui dans la création et l'étude de plusieurs appareils de mesure et enregistrateurs ainsi que dans la réalisation de la soufflerie en bois dans la chapelle à Toulouse. Ses témoignages écrits sont très riches d'informations et soigné dans le moindre détail.

(a)]
Le Château de Péchestier, le lieu de résidence (habitation) pour la période de la guerre pour une grande partie du personnel. Les autres ont habités à Toulouse même non loin de leur lieu de travail. Photo datée de juin 1940, Collection Dubois, [Archives de l'ONERA Lille].

(b)]
La Chapelle transformée en local de travail, Collection Rollin, date non précisée, [Archives de l'ONERA Lille].

5.1 Le comité d'Aéronautique

Pendant l'occupation allemande, l'activité du réseau des pôles de mécanique des fluides ainsi que d'autres institutions d'aéronautique était coordonnée et gérée par le *Comité d'Aéronautique* présidé par l'Inspecteur Général Leroux et sous la tutelle du GRA. Il comprenait des personnalités comme le directeur du GRA, Raymond Poincaré, le chef de la Section des Études Générales au Service Technique de l'Aéronautique (STAe), l'Inspecteur Général de l'Enseignement et des Recherches Aéronautiques, Dumanois, le chef de la Section Avion du STAe, le Chef du Bureau d'Études Avions Bois à l'Atelier d'Études Aéronautiques mais aussi les directeurs des instituts de mécaniques des fluides (H. Villat, J. Kampé de Fériet, J.Pérès, C. Camichel), le directeur de l'Institut Aéro-Technique de Saint-Cyr, A. Toussaint, le directeur du laboratoire de mécanique des fluides expérimentale de l'Institut de Mécanique des Fluides de Paris, A. Foch ; Wehrlé et Dedebant de l'ONM, l'ingénieur A. Lapresle, collaborateur puis successeur d'Eiffel à la soufflerie d'Auteuil, et d'autres ingénieurs ou personnalités du ministre de l'Air et du GRA.

La lecture des procès-verbaux de ce comité permet tout d'abord de donner des informations utiles pour comprendre les mécanismes de gestion de la recherches en mécanique des fluides effectuée en clandestinité durant ces années autour du GRA. Nous ne sommes pas certains de la date de création de comité. Cependant, il est certain qu'il existait déjà à partir de 1941. La preuve en est que le 26 juin 1941, le conseil d'administration du G.R.A avait nommé Leroux et Lapresle respectivement comme président et vice-président de ce comité. Les diverses personnalités du comité se rencontraient périodiquement à Clermont-Ferrand, la ville où le G.R.A s'était replié suite à l'occupation allemande. Le but de cet organisme était de préserver la continuité des recherches entreprises avant la guerre. D'un côté, il établit la nature des recherches qui doivent être poursuivies par le G.R.A pendant le conflit ; de l'autre côté il concentre ses efforts pour continuer ses publications. Dans ce contexte, le G.R.A prendra la suite du Service Technique de l'Aéronautique (STAe) d'Albert Caquot qui, avant la période de conflit, s'occupait de mettre en œuvre les collaborations scientifiques entre le ministre de l'Air, les institutions d'aéronautique et les instituts de mécanique des fluides [7]. En d'autres termes, toute la recherche en mécanique des fluides intéressant l'aéronautique et lancée antérieurement par le STAe, était maintenant gérée par le G.R.A.

Ces sources primaires font ressortir aussi les difficultés du comité et du G.R.A dans la conduite de certaines de leurs études, dues au manque d'un outillage complet suite à son déménagement de Paris à Clermont-Ferrand et à l'impossi-

7. Sur le rôle du STAe au sein de ministre de l'Air voir le deuxième chapitre.

bilité d'utiliser les souffleries des zones occupées telles que la grande soufflerie de Chalais. Puisqu'elle ne disposait plus des souffleries verticales et horizontales, ce manque le conduit à mettre au point "une procédure lui permettant de faire appel à des laboratoires extérieurs pour l'exécution des recherches que ses moyens expérimentaux actuels ne lui permettaient pas d'assurer dans ses installations propres" [8]. C'est le cas, par exemple, de l'Institut de mécanique des fluides de Marseille qui avait réservé ses installations, notamment la grande soufflerie, par priorité aux essais demandés par le GRA. D'autres difficultés proviennent du matériel détruit ou perdu dans les divers centres de mécanique des fluides. En ce qui concerne l'IMFL, une bonne partie du matériel nécessaire pour les essais du G.R.A était resté à Lille ou détruit au cours de l'exode. Cela empêchait des essais comme ceux avec une maquette libre catapultée et braquage brusque des gouvernes en vol. A Poitiers la maquette d'hélice était périmée et il fallait la reconstruire.

Selon ces documents, le G.R.A a réussi à poursuivre une bonne partie des travaux du STAe et à en créer des nouveaux malgré les difficultés et l'interruption de certaines études. Dans ce dernier cas, nous pouvons mentionner l'étude de A. Favre à l'institut de mécanique des fluides de Marseille sur l'aile à parois mobiles montrant les qualités particulières de celle-ci ainsi que l'étude d'un projet d'un tunnel hydrodynamique à réaliser à Toulouse sous la demande de L. Escande, à l'époque le directeur de l'Institut de Mécanique des fluides de Toulouse [9]. En ce qui concerne l'étude de la turbulence, Wehrlé avait demandé au G.R.A d'entreprendre toute une série d'essais afin de trouver des données expérimentales visant à simplifier les équations du mouvement turbulent. Dans ce contexte, c'est Favre qui est désigné à être chargé d'effectuer des mesures pour Wehrlé. Pérès, sur demande du comité, avait étudié la répartition de la portance en envergure, qui donnera lieu plus tard à une publication des *tables numériques et abaques pour les calculs d'ailes*. Outre la poursuite de la recherche, le comité d'Aéronautique s'intéressa aussi à la formation des chercheurs en instituant un système de bourses (sous forme de retenues analogues aux taxes d'apprentissage) pour des thèses d'ingénieur-docteur concernant l'aéronautique. Le comité avait donné l'étude de ce nouveau système de formation à Toussaint et à L. Escande.

Enfin, dans ces procès-verbaux, nous pouvons remarquer que l'IMFL et Kampé de Fériet avaient une grande place au sein de ce comité et du GRA. Les travaux expérimentaux de l'IMFL, son outillage scientifique et le choix décisionnel de Kampé de Fériet par rapport à certaines études expérimentales de ce comité sont

8. Procès-verbaux du comité d'Aéronautique, 8 janvier 1942, [Archives de l'ONERA Lille].

9. Pour une liste (non exhaustive) des travaux effectués par le comité voir les procès-verbaux du comité d'Aéronautique du 8 janvier 1942 et 15 mai 1943, [Archives de l'ONERA Lille].

les plus mentionnées. Ils font ressortir un institut qui a participé activement aux projets clandestins du comité et de façon plus intense par rapport aux autres instituts [10]. Nous verrons dans la prochaine section quel est le rôle de l'institut au sein du comité.

5.2 L'IMFL à Toulouse

D'après les rapports des activités de l'IMFL rédigés par le personnel de l'institut pendant la période comprise entre le 3 septembre 1939 et le mois de mai 1940, la soufflerie horizontale de l'IMFL a été utilisée intensivement par divers avionneurs alors que la soufflerie d'étalonnage de Rollin construite en 1939 (de type Eiffel avec une veine d'expérience de diamètre 0,80 m) sert à étudier les capteurs météorologiques pour les besoins de l'Armée [11]. Plus tard, l'évacuation de Lille et l'arrivée à Toulouse, posèrent de nombreux problèmes. Tout d'abord, il fallait étudier les possibilités de l'avenir de l'institut. Dans ce contexte, Kampé de Fériet avait examiné différentes hypothèses : le cas où l'institut reprendrait, après un retour prochain à Lille, une activité analogue à celle interrompue par la guerre ; le cas où l'institut aurait à reconstruire une installation expérimentale soit à Toulouse soit en Afrique du Nord ; le cas où l'institut s'engagerait à une activité non expérimentale fondée sur des travaux de publication, traduction et de rédaction d'un "Manuel Général d'Aéronautique" en langue française [12]. Face à ces hypothèses, Kampé de Fériet, sous conseil du GRA, optera pour la construction d'un laboratoire expérimental à Toulouse [13].

Par voie de conséquence, il fallait affronter toutes les difficultés de construire un nouveau laboratoire dans la Chapelle avec peu de moyens et matériels à disposition. D'un côté, reconstruire les appareils détruits lors de l'exode et ceux restés à Lille ; de l'autre côté, fabriquer une soufflerie afin de poursuivre leurs recherches interrompues par la guerre et en entreprendre des nouvelles demandées par le comité d'Aéronautique. Dans cette section nous analyserons d'abord quelle est la place de l'IMFL au sein du comité d'Aéronautique. Là nous verrons que, malgré les difficultés imposées par la guerre qui émergent des rapports d'activité de l'IMFL,

10. Le nom de Villat, un exemple extrême, n'apparait que dans la liste des membres du comité qui se sont excusés pour leurs absences à leur réunion.

11. Voir les rapports succincts des activités de l'IMFL du 18 novembre 1939 et du 8 février 1940, [Archives de l'ONERA Lille]. Les documents sont rédigé par Kampé de Fériet.

12. IMFL, rapport succinct sur l'activité de l'institut, 1940 mois non précisé, [Archives de l'ONERA Lille].

13. Kampé de Fériet, rapport sur l'activité de l'institut pendant le mois d'aout 1940, [Archives de l'ONERA Lille].

cet institut poursuivra ses études lilloises, et il en entreprendra de nouvelles grâce aussi à la réalisation de la soufflerie en bois à faible turbulence.

5.2.1 Le rôle de l'IMFL dans le comité d'Aéronautique

Avant d'effectuer une recherche quelconque, l'institut devait demander l'autorisation au GRA, le seul qui pouvait ouvrir chaque étude [14]. Le G.R.A devait être au courant de toutes les études, celles préliminaires, commandes, ouvrage d'immobilisation et ouvrages divers de l'institut. [15]

En lisant les rapports rédigés par l'IMFL, il semble que le personnel de l'IMFL ait du affronter plusieurs difficultés à la Chapelle. Tout d'abord, la perte des instruments nécessaires pour continuer leurs travaux soit parce qu'ils étaient restés à Lille soit parce qu'ils avaient été détruit pendant le trajet de Lille à Toulouse. Par exemple, le prototype du météorographe [16] qui avait été réalisé par l'IMFL, fut détruit lors du déménagement à Toulouse. C'est dans ce contexte que le comité d'Aéronautique estime que le G.R.A devrait faire réaliser à l'IMFL un nouvel exemplaire de l'appareil [17]. En avril 1943, cet instrument n'était pas encore réalisé car l'oscillographe électromagnétique fabriqué par la Maison Beaudouin [18], qui devait être terminé au début de février, n'avait pas encore été livré [19]. En second lieu, en ce qui concerne les études entièrement nouvelles, les difficultés dépendent des rythmes lents de fabrication des usines concernées. Par exemple, la construction du planeur laboratoire M.C Jalon n. 02 décidé en janvier 1942 -susceptible

14. A titre d'exemple, voir la lettre officielle du 1er mai 1943 de R. Poincaré (président du GRA) autorisant l'IMFL à ouvrir l'étude 81E21 "Recherches sur la distribution des vitesses dans les fentes" [Archives de l'ONERA Lille].

15. Pendant cette période, le personnel de l'IMFL croît d'une trentaine de personnes à près de 70 en 1942, et 90 au début de 1945 : le personnel n'a jamais eu un nombre si élevé de membres avant la guerre ! A ce propos, voir la lettre n. 1 de Maurice Dubois du 07 mars 2003, Mise au point et exploitation de la grande soufflerie à retour de l'IMFL à Toulouse, [Archives de l'ONERA Lille].

16. Il s'agit d'un instrument enregistrant simultanément plusieurs éléments météorologiques sur le même diagramme, y compris la pression, la température et l'humidité.

17. Procès-verbaux du comité d'Aéronautique, 8 janvier 1942, [Archives de l'ONERA Lille].

18. La Maison Beaudouin fondée par Charles Beaudouin, est une maison née avant 1914 qui fabriquait des instruments scientifiques et travaillait principalement dans les domaines de l'optique, la spectrographie, la radioactivité, le vide, la TSF, l'oscillographie, la cristallographie, la biologie et le magnétisme. Elle fournit également des instruments aux institutions intéressant l'aéronautique comme le G.R.A ou la météorologie (l'ONM). Elle restera en contact avec le G.R.A pendant la guerre, et se chargera de fournir une grande partie des appareils, malgré les grandes difficultés d'approvisionnement de l'heure. Sur son histoire et son activité pendant la guerre voir [Beaudouin 2005].

19. GRA-IMFL, État des études au 1er Avril 1943. Document rédigé par André Martinot-Lagarde, [Archives de l'ONERA Lille].

de voler à grande vitesse et à haute altitude-, n'était pas encore complètement terminé en avril 1943 car les usines qui fabriquaient certaines pièces de l'avion, notamment les usines Fouga d'Aire sur l'Adour ont cessé leur fonctionnement [20]. Parfois, au lieu de reconstruire les appareils, ils utilisaient d'autres méthodes qui impliquaient des instruments déjà à disposition. Par exemple, en l'absence de l'anémomètres à fil-chaud, qui n'est pas encore livré (attendu de Grenoble pour le 1er octobre 1942, mais qui en avril 1943 n'était pas encore terminé), les mesures de la turbulence en soufflerie étaient faites en utilisant la méthode de la sphère et celle du cylindre de Paul Guienne que nous avons montrées dans le troisième chapitre [Guienne 1940].

En comparant les rapports sur les études conduites immédiatement avant et pendant la guerre, nous pouvons cependant remarquer qu'il y a eu une profonde continuité entre les travaux effectués à Lille et ceux actuels à Toulouse, malgré toutes ces difficultés. Ces études concernaient la variation des efforts aérodynamiques dans les variations rapides d'incidence ; les mesures de la turbulence des diverses souffleries françaises (mesures effectuées en juin 1939, il reste à dépouiller les clichés des données obtenues) ; les recherches sur la turbulence atmosphérique et les basses couches de l'atmosphère ; les recherches de l'influence du souffle de l'hélice sur les divers coefficients aérodynamiques d'une maquette ; l'étude comparative en vol des profils à faible coefficient de traînée minimum, et les recherches bibliographiques sur les travaux exécutés à l'étranger concernant les actions relatives des fuselages et de l'aile. En parallèle, la réalisation de la soufflerie en bois à faible turbulence, permettra d'effectuer un grand nombre d'autres nouvelles études demandées par le comité d'Aéronautique. Sa création et son activité constituent l'objet du prochain paragraphe

5.2.2 La mise au point de la "soufflerie Bois"

L'exigence d'une soufflerie à faible turbulence est explicite dans un rapport de Kampé de Fériet sur l'activité de l'institut pendant le mois d'août 1940 :

> La nécessité de la construction d'une soufflerie, avec un diamètre de veine d'au moins 3 m et si possible de 5 m, à très faible turbulence (coefficient de turbulence $\frac{\sqrt{u'^2}}{U_0}$ s'abaissant à 0,001, au lieu de 0,02 à 0,03 pour les souffleries normales).

20. GRA-IMFL, État des études au 1er Avril 1943. Document rédigé par André Martinot-Lagarde,[Archives de l'ONERA Lille].

> L'urgence d'une telle soufflerie pour faire progresser l'Aérodynamique dans toutes les recherches fines, où joue un rôle la position du point de transition de la couche limite laminaire à la couche limite turbulente, ressort nettement d'un examen critique des mesures de turbulence faites dans l'Atmosphère, d'une part en Angleterre, d'autre part aux États Unis, enfin pour l'IMFL dans le Sahara [21]. [...] Dans toutes les questions délicates où intervient la position du point de transition on peut donc affirmer qu'il est indispensable d'expérimenter dans une soufflerie dont le coefficient de turbulence soit égal au maximum à 0,001, l'idéal non encore atteint aujourd'hui étant 0,0005. [...] J'estime qu'en perfectionnant la technique du prototype de M. Rollin qui a donné d'excellents résultats, en remplaçant en particulier le retour libre par un retour guidé, comme je l'indiquais dans mes lettres n. 3.304 du 7 mai et 3.308 du 9 mai nous possédons tout ce qu'il faut pour réussir [22]."

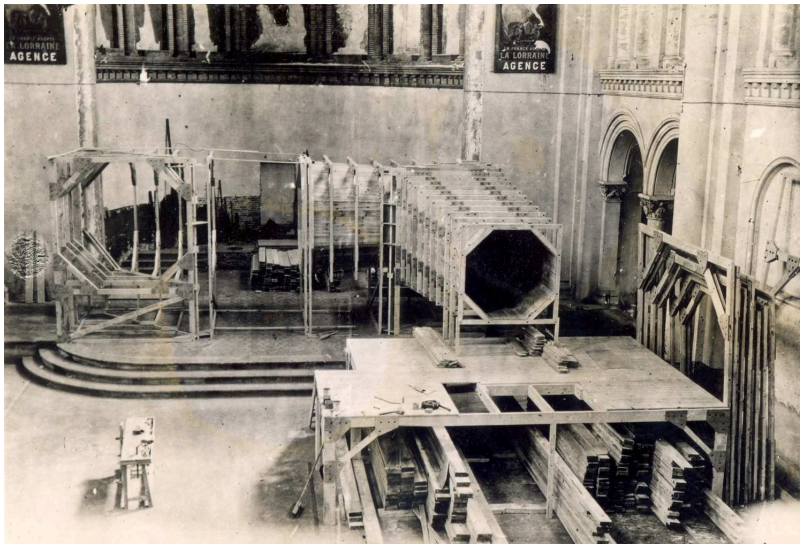
Ainsi, en automne de la même année, George Rollin commence à étudier la construction d'une soufflerie à retour [23] à faible turbulence qui sera installée dans la Chapelle de Toulouse. Avec la collaboration de Maurice Dubois, qui se charge de dessiner les plans de la soufflerie et de relever les dimensions intérieures de la chapelle, il construit une soufflerie qui commencera à fonctionner à partir du 1er janvier 1942. Le diamètre de la veine ne sera pas de la même grandeur souhaitée par Kampé de Fériet ("d'au moins 3 m et si possible de 5 m") car les dimensions de la soufflerie sont déterminées à partir de la nef de la Chapelle et de la puissance d'un moteur disponible (120 CV). Cela a conduit à un diamètre de veine de 1,20 m pour une vitesse maximale estimée à 50 m/s, et une dimension intérieure de 5,4 m dans la plus grande section de la buse, à l'entrée du collecteur. Compte tenu du matériel disponible à l'époque, la soufflerie a été réalisée en bois en épousant la forme octogonale de sa tubulure [Figure 5.2] [24].

21. A ce propos voir le troisième chapitre.

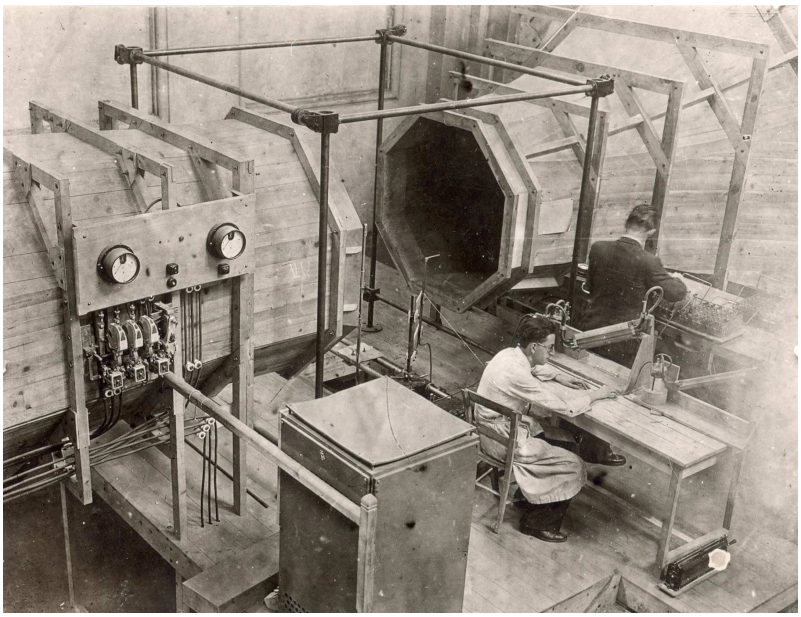
22. Il fait référence aux résultats atteints par Rollin dans la réalisation à Lille d'une soufflerie d'étalonnage de 0,80 m.

23. Il s'agit du type de soufflerie employé par Prandtl à Göttingen. Au contraire de la soufflerie du type Eiffel (la soufflerie horizontale de l'IMFL à Lille par exemple) l'air n'est pas emprunté directement à l'extérieur, mais circule dans une installation fermée. C'est donc pratiquement toujours le même air qui est en circulation. La veine d'essais de la soufflerie où on place la maquette, peut être fermée ou ouverte.

24. Entretemps, une autre soufflerie à retour fut réalisée, plus petite que la première (0,30 m de diamètre de veine). Installée à l'entrée de la nef de la Chapelle et disposée de façon perpendiculaire à la première, elle sera inaugurée le 9 avril 1941 par le directeur du GRA, Poincaré et l'Inspecteur Général de l'Aéronautique, Dumanois.



(a) La "soufflerie bois" en construction dans la chapelle-laboratoire de Toulouse avec des dimensions déterminées à partir de la nef de la Chapelle. Elle est réputée pour être une soufflerie performante, "basse turbulence" .



(b) La veine d'essais ouverte de la "soufflerie bois". Au milieu de 1943, elle sera équipée d'une veine guidée .

FIGURE 5.2 – La soufflerie bois. Photos de la collection Rollin, (date non précisée) [Archives de l'ONERA Lille].

Ensuite, son utilisation fut confiée à l'équipe de Guienne, lequel à Lille était le responsable de la grande soufflerie. Les premiers essais consistaient en la mise au point de la soufflerie et l'exploration de la stabilité. Puis, au cours de l'année 1943, ils commencèrent à entreprendre des mesures de la turbulence de l'écoulement. Dès la conception de la soufflerie, l'un des objectifs à poursuivre était l'obtention d'une très faible turbulence en veine, qui devait être favorisée par la longueur importante de la chambre de tranquillisation et le grand taux de contraction du collecteur (de l'ordre de 25, une valeur très élevée à l'époque) [25]. Afin de déterminer l'intensité de la turbulence de la soufflerie en fonction du nombre de Reynolds critique, les membres de l'institut avaient choisi la méthode de la mesure de la traînée d'une sphère. Sans entrer dans le détail de cette méthode, l'idée était la suivante : la chute du coefficient de traînée, consécutive au passage du régime laminaire au régime turbulent, caractérise le nombre de Reynolds critique qui est proportionnel à la faiblesse de l'intensité de la turbulence. En appliquant cette méthode à plusieurs sphères de différents diamètres, les collaborateurs ont trouvé que la valeur du nombre de Reynolds est de 370000, un nombre assez satisfaisant étant donné que la valeur limite du nombre déterminée en vol est 385000. De plus, une campagne de comparaison entre une dizaine de souffleries de différents organismes, entreprise par l'IMFL et impliquant les souffleries de Toulouse (IMFT), au Mont Lachat (GRA) et dans la région parisienne (Eiffel, Saint-Cyr), montre que la soufflerie IMFL est la moins turbulente de toutes celles essayées [Moraux 1943] [Figure 5.3].

Les essais se poursuivront de façon régulière même en 1945, où l'IMFL lancera un programme de recherche sur les dispositifs hypersustenateurs. La soufflerie continuera à fonctionner jusqu'à l'abandon de la Chapelle, en 1948. Elle sera démontée et transférée de Toulouse à Poitiers, à l'École Nationale Supérieure de Mécanique et d'Aéronautique (ENSMA) où elle fonctionne encore et reste désignée sous le nom de "Soufflerie Bois".

A côté des études pour le comité d'Aéronautique et les essais de la soufflerie en bois, Kampé de Fériet poursuivra également ses recherches théoriques sur le problème de la turbulence homogène essayant de pousser beaucoup plus loin la théorie des fonctions aléatoires. Une partie de ses recherches seront développées, à Toulouse, par Naftali Frenkiel.

Plus tard, après 1943, la soufflerie ne sera pas seulement utilisée par les aérodynamiciens lillois mais aussi par les ingénieurs de Toulouse. De nombreuses études

25. Lettre n. 1 de Maurice Dubois du 07 mars 2003, Mise au point et exploitation de la grande soufflerie à retour de l'IMFL à Toulouse, [Archives de l'ONERA Lille].

seront effectuées dans ce contexte, comme par exemple les mesures d'exploration de la pression de la soufflerie dans ses deux états, ouverte et guidée, conduites en 1944. "Ces mesures avaient montré une variation longitudinale, plus importante en veine guidée qu'en veine libre. Une expérimentation est alors entreprise, d'abord dans la petite soufflerie de 0,30 m puis dans la grande de 1,20 m, afin d'uniformiser la pression le long de la veine" [26]. L'expérience fut conduite par A. Fauquet, aidé par A. Martinot-Lagarde et son assistant Pierre Gryson [Figure 5.4].

26. Lettre n. 1 de Maurice Dubois du 07 mars 2003, Mise au point et exploitation de la grande soufflerie à retour de l'IMFL à Toulouse, [Archives de l'ONERA Lille].

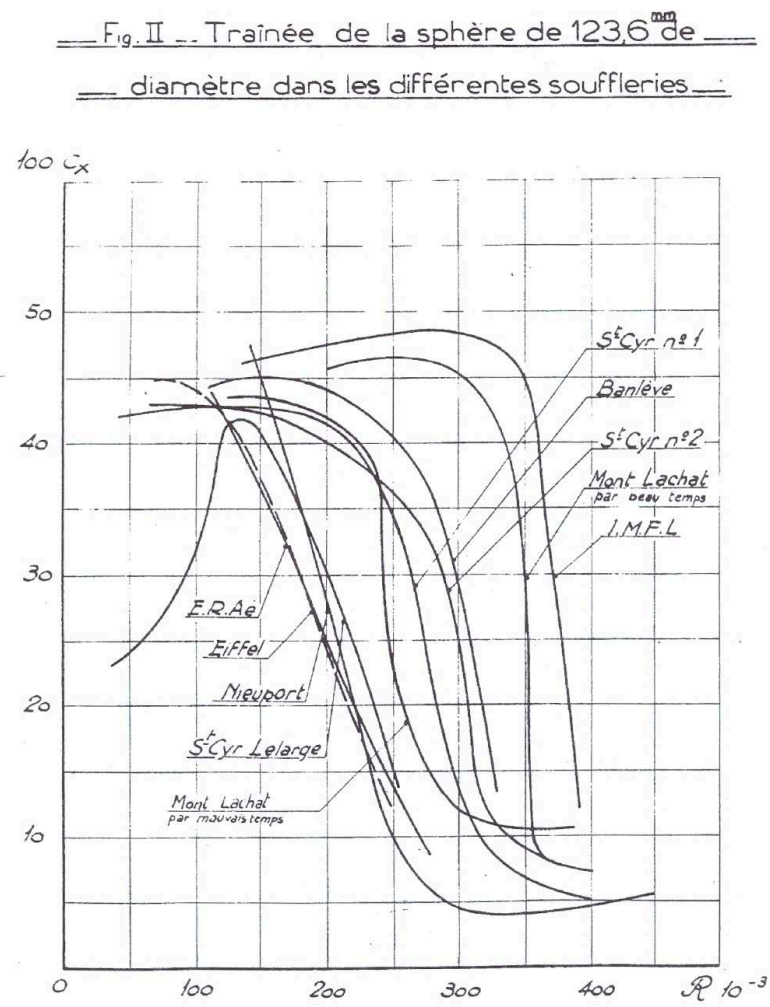


FIGURE 5.3 – Comparaison des divers nombres critiques de Reynolds en fonction du coefficient de traînée obtenus dans une dizaine de soufflerie. Nous pouvons remarquer la valeur 370000 correspondant à l'IMFL, ce qui indique une turbulence très faible par rapport aux autres [Moraux 1943].

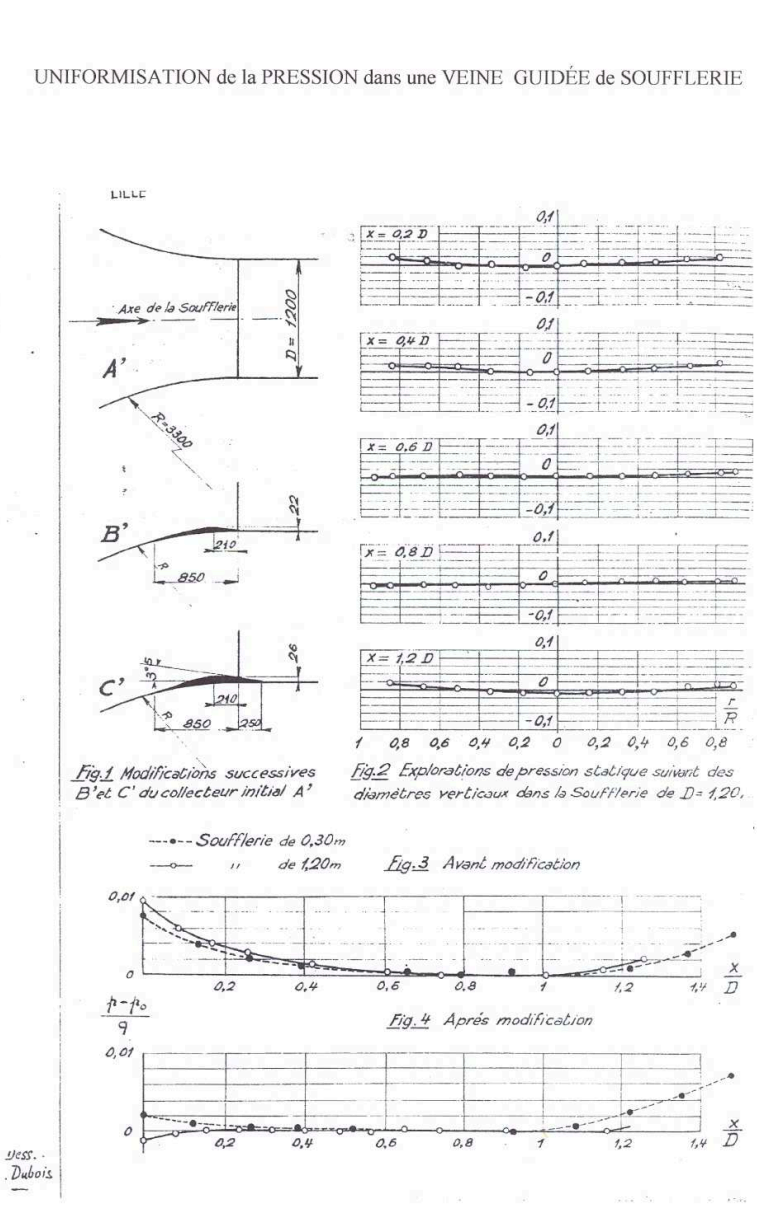


FIGURE 5.4 – Résultats obtenus par Fauquet, Martinot-Lagarde et Gryson afin d'uniformiser la pression le long de la veine guidée [Fauquet 1946].

5.3 Le travail en clandestinité de l'IMFL à Toulouse. Le cas de Naftali Frenkiel

L'étudiant de Kampé de Fériet, Naftali Frenkiel (1910-1986) est un physicien très connu parmi les mécaniciens des fluides américains des années 1950-1970. Pendant ces années, il est en effet, l'un des plus importants spécialistes de la théorie de la turbulence et de la physique des fluides en connexion avec la chimie, la géophysique, mathématique et aéronautique ainsi que la physique du plasma. Il est connu également pour la création de modèles mathématiques de la pollution urbaine et pour ses recherches d'application du calcul digital à grande vitesse à la mesure de la turbulence. Au delà de sa contribution scientifique, il joue aussi un rôle institutionnel vital au sein de l'émergente communauté américaine de la mécanique des fluides et il a une position internationale bien consolidée dans les IUTAM. En effet, il est fondateur et éditeur pour longtemps de la revue *Physics of Fluids* (1958-1981), une importante revue de référence pour la communauté de mécanique des fluides américaine ainsi que celle internationale. En outre, il est un membre très actif de l'American Physical Society ainsi que de l'American Geophysical Union et l'American Association for the Advancement of Science. Depuis 1984, l' American Physical Society a établi le prix annuel "François Naftali Frenkiel Award" qui s'adresse aux jeunes scientifiques qui ont publié des articles de physique des fluides dans sa revue. Après une année au département d'ingénierie aéronautique de l'Université Cornell et deux années à la US Naval Ordance Laboratory, il devient, en 1950, le responsable d'un groupe de recherche de mécanique appliquée et théorique du laboratoire de physique appliquée de la Johns Hopkins University (Maryland). En 1960, il deviendra professeur dans le département des mathématiques computationnelles à la US Naval Ship Research and Development Center in Carderock, toujours dans le Maryland. Il y restera jusqu'à sa retraite, en 1981.

Si la vie scientifique et institutionnelle de Frenkiel aux États-Unis est connue [27], nous ne pouvons pas dire la même chose pour la période antérieure aux années 1950, celle où Frenkiel se trouvait d'abord en Belgique et ensuite en France. Si en Belgique, il s'est formé, à l'IMFL il prépare une thèse sous la direction de Kampé de Fériet, en travaillant en clandestinité pendant le repli de l'institut à Toulouse. Dans sa note intitulée *Étude de la diffusion turbulente par une méthode colorimétrique* et présentée à l'Académie des Sciences lors de la séance du 13 mai 1946, il écrit qu'il s'agit d'un "travail effectué en partie à Toulouse en 1941 dans la clandestinité avant la déportation" [Frenkiel 1946a]. Son arrestation en avril 1943,

27. Sur sa vie scientifique et institutionnelle aux États-Unis voir par exemple [Emrich et. al. 1987].

interrompra ses recherches, qui reprendront en 1945, lorsqu'il demandera au Doyen de la Faculté des Sciences de Lille de soutenir sa thèse. Dans cette section, nous présenterons tous les aspects caractérisant sa période d'études en Belgique et en France.

5.3.1 La période franco-belge de Naftali Frenkiel

Sa formation : de Gand à Lille (1933-1939)

Naftali François Frenkiel est né à Varsovie le 19 septembre 1910. En 1933, après avoir obtenu un diplôme d'ingénieur mécanicien à l'Université de Gand, il rentre en Pologne où il suit des cours à l'Institut Aérodynamique de Varsovie (1933-1934) et il effectue un stage (1934-1935) dans des usines de construction de machines (Łódź) et des usines de soudure (Varsovie). En 1935, il retourne à Gand et il obtient, après deux ans, un diplôme d'ingénieur de constructions aéronautiques et automobiles. A partir de ce moment-là, il s'intéressera exclusivement au domaine de l'aéronautique. En 1937, il commence à travailler pour le Service Technique de l'Aéronautique Belge (à l'époque sous la tutelle du ministère des Transports), en effectuant des recherches sous la direction de F. Haus et en collaborant aux études du laboratoire d'Aérodynamique de l'Université de Gand. Dans ce contexte, il entreprend des études expérimentales dans la soufflerie de Rhode-St-Genése installée dans le laboratoire aérotechnique de Belgique, (l'actuel Institut von Karman de dynamique des fluides, près de Bruxelles). Ces types d'études concernent notamment celles de la vrille et l'influence des différentes parties de l'avion, les oscillations d'une maquette autour de son axe longitudinal, l'attaque oblique, les systèmes hypersustentateurs. C'est grâce à eux qu'il reçoit le Prix scientifique interfacultaire Louis Empain, un prix assez connu en Belgique. Cette expérience en Belgique perdurera jusqu'en juin 1939, quand il entrera à l'IMFL pour travailler sous la direction de Kampé de Fériet.

Son expérience à l'IMFL (1939-1943)

Jusqu'au mois du mai 1940, Frenkiel effectuera des expériences sur les écoulements turbulents dans les souffleries horizontale et verticale de l'IMFL. Ensuite, l'occupation allemande de Lille et le repli de l'IMFL à Toulouse qui s'ensuivit furent dramatiques pour Frenkiel qui était d'origine juive. Une fois arrivé à Toulouse, comme les autres collaborateurs, ses premières activités furent consacrées à la mise sur fiche et la traduction des livres et fascicules dont l'IMFL disposait au château, ainsi que l'étude critique des activités expérimentales conduites à Lille, notamment dans la soufflerie verticale. En effet, le laboratoire à la Chapelle n'était pas encore prêt pour effectuer des travaux expérimentaux et le personnel

se dédiait à ces activités. Ensuite, il se consacrera à la réalisation de sa thèse et toute une série de travaux concernant la turbulence : méthodes de mesures de la diffusion turbulente en soufflerie et dans l'atmosphère, de la turbulence des souffleries soit par les essais de diffusion soit avec l'anémomètre à fil chaud, et le développement, du point de vue expérimental, des quelques idées de Kampé de Fériet sur la théorie statistique de la turbulence. Dans ce cadre, il effectuera des essais pas seulement dans la soufflerie en bois mais aussi dans celle de Banleve à l'Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse, avec l'autorisation de Camichel. Ses travaux effectués en clandestinité sont conservés dans les archives de l'ONERA Lille. Une partie ne sera jamais publiée ; une autre sera publiée après la guerre sur la revue du G.R.A ou sous forme de résumé sur les Comptes Rendus de l'Académie des Sciences. Nous verrons sa contribution scientifique effectuée en clandestinité à Toulouse dans la prochaine sous-section.

La déportation (1943-1945) et le retour à Toulouse (1945-1947)

En novembre 1942, les allemands avaient occupé aussi une bonne partie du sud de la France, y compris la ville de Toulouse. Rester en France devenait de plus en plus dangereux. Frenkiel demande alors un visa de sortie de France pour aller aux États-Unis. Là, il est connu surtout à Caltech et à l'Université de Michigan. Il a aussi obtenu en mai 1941 facilement un affidavit [28] à l'université de Michigan qui certifie le prendre à sa charge. En août 1941, il obtient son visa mais pour lui seul, sa femme, Malka Frenkiel, a été oubliée. Ainsi, il fait une nouvelle demande de visa et en février 1942 ce document est prêt pour tous les deux. Cependant, un problème bureaucratique l'oblige à effectuer une troisième demande de visa en juillet 1942. En effet, entretemps, les formalités pour obtenir le visa d'entrée aux États-Unis ont changé et leur visa n'est plus valable. Le troisième visa n'arrivera jamais malgré l'aide de Martinot-Lagarde et du doyen de la Faculté des Sciences de Toulouse [29]. Frenkiel et sa femme seront internés en avril 1943 par les autorités italiennes à Barcelonnette. En septembre 1943, ils seront arrêtés par les SS et puis déportés à Borgo. S. Dalmazzo, à Auschwitz et puis à Buchenwald. Frenkiel sera rapatrié en France le 30 avril 1945 alors que sa femme mourra dans un de ces camps de concentration.

Au retour en France, le 28 septembre 1945, il demandera au Doyen de la Faculté des Sciences de Lille de pouvoir soutenir sa thèse, ce qui montre un fort désir de revenir à la normale et de poursuivre ses recherches en mécanique des fluides :

28. Il s'agit d'une déclaration sous serment.

29. Voir la lettre de Martinot-Lagarde au Ministre secrétaire d'État au ravitaillement, Vichy. Elle est datée du 8 octobre 1942. [Archives de l'ONERA Lille].

> J'ai l'honneur de solliciter de votre haute bienveillance l'autorisation de soutenir une thèse, en vue de l'obtention du Doctorat de l'Université de Lille, sur le sujet suivant : Étude statistique de la turbulence : Fonctions spectrales et coefficients de corrélation.
> Les recherches ont été exécutées et mon manuscrit (actuellement entièrement prêt pour l'impression) a été rédigé de 1941 à 1943, sous la direction de Kampé de Fériet, alors replié à Toulouse.
> Étant obligé de travailler dans la clandestinité, pendant que j'ai travaillé avec Monsieur Kampé de Fériet, il m'a été impossible de me préparer et de me présenter aux examens de licence.
> J'ai donc l'honneur de vous demander, en considération des circonstances pénibles dans lesquelles j'ai vécu depuis 1940, de bien prendre en considération mes diplômes d'ingénieur mécanicien de l'Université de Gand (1933) et d'ingénieur des constructions aéronautiques et automobiles de l'Université de Gand (1937) et de m'accorder les dispenses nécessaires pour la soutenance de ma thèse ". [30]

Il restera à Toulouse jusqu'à 1947, date où il quittera la France pour aller aux États-Unis, plus précisément au Département d'ingénierie aéronautique de Université de Cornell, sous la tutelle de von Kármán.

5.3.2 Le travail en clandestinité de Frenkiel

La condition de clandestinité dans laquelle Frenkiel a effectué ses travaux est explicitée dans ses travaux réalisés à Toulouse. Dans ce paragraphe, nous donnerons un résumé des résultats obtenus pendant la guerre, résultats qui sont certainement moins connus par rapport à ceux atteints aux États-Unis plus tard. Dans ce contexte, nous verrons aussi que ces travaux s'insèrent parfaitement dans le contexte théorie/pratique dont nous avons parlé dans le troisième chapitre.

Étude statistique de la Turbulence – Fonctions spectrales et coefficients de corrélation

Malheureusement nous n'avons pas trouvé la thèse de Frenkiel. La seule chose qui ressemblerait à une Thèse est un Rapport Technique (n.34) du G.R.A. intitulé *Étude statistique de la Turbulence – Fonctions spectrales et coefficients de corrélation* datant de 1948 [Frenkiel 1948]. Ce titre, en effet, coïncide avec celui mentionné dans sa lettre adressée au Doyen de la Faculté des Sciences (voir ci-dessus). De plus, dans sa communication présentée au congrès ICAM de Paris (1946), *Quelques*

30. Frenkiel au Doyen de la Faculté des Sciences de Lille, le 28 septembre 1945, [Archives de l'ONERA Lille].

Recherches sur la turbulence [31] - où il présente un résumé des toutes les recherches effectuées pendant sa période à l'IMFL, il fait un résumé des résultats de sa thèse. Ces résultats coïncident avec ceux publiés dans [Frenkiel 1948]. Le même Frenkiel, dans l'introduction de sa publication déclare que ce travail a été fait en 1941 et que le rapport a été rédigé en 1942, sans tenir compte des résultats plus récents. Nous allons donc exposer les résultats de sa publication de 1948, que nous espérons être ceux de sa thèse et qui correspondent, en tout cas, à ce qu'il a obtenu pendant son activité en clandestinité à Toulouse.

Dans ce travail, il donne une contribution à la théorie statistique de la turbulence, en se proposant de fournir un ensemble de représentations analytiques des courbes expérimentales de corrélation, ce qui permet de calculer facilement certaines caractéristiques statistiques de la turbulence et en particulier le spectre de la turbulence dans le cas d'un fluide homogène et isotrope. Dans ce contexte, afin de représenter une courbe de corrélation par une fonction, il s'est focalisé sur la fonction $R(h) = exp(-Kh)$ [32], considérée comme importante pour les praticiens dans la représentation des valeurs expérimentales des courbes de corrélation. Frenkiel étudie cette fonction et arrive à la conclusion que pour représenter rigoureusement les courbes expérimentales du coefficient de corrélation entre les deux vitesses aux instants t et $t+h$, il est intéressant d'employer les fonctions $exp(-K|h|)\phi(h)$ où $\phi(h)$ est un polynôme géométrique ou trigonométrique. En particulier, il a obtenu un excellent accord entre certaines courbes de corrélation expérimentales et les courbes représentant des fonctions du type :

$$R(h) = [1 + \sum A_n r^n] exp(-k|h|) \text{ et } R(h) = \sum A_n exp(-k_n|h|) \tag{5.1}$$

Juste pour faire un exemple, les courbes expérimentales de corrélation transversaux R_y et longitudinaux R_x mesurées par Simmons et Salter à la National Physical Laboratory (NPL) seront représentées respectivement par une équation de la forme :

$$R_y(y) = (1 + A_y) exp(-k|y|) \tag{5.2}$$

et par une équation déduite de :

$$R_x(x) = \frac{2}{x^2} \int_0^x s R_y(s) ds \tag{5.3}$$

Dans ce cas ainsi que dans d'autres exemples relatifs à des courbes de corrélation mesurées par d'autres expérimentateurs, il montre un parfait accord entre les

31. Document non publié et conservé dans les Archives de l'ONERA Lille
32. Nous respectons la notation utilisée par Frenkiel dans ses manuscrits.

points expérimentaux et les courbes fonctionnelles [Figure 5.5].

En ce qui concerne le spectre de la turbulence, il trouve que le spectre de la turbulence mesurée par Simmons et Salter au NPL peut être représenté par une courbe correspondant à une fonction de corrélation de la forme :

$$R_t(h) = Aexp(-k_1 h^2) + Bexp(-k_1 h^2) \tag{5.4}$$

et qui est en parfait accord avec la courbe expérimentale [Figure 5.6].

Application de la théorie de Kampé de Fériet aux essais sur la diffusion turbulente (1941)

Ce travail (non publié) vise à développer les idées théoriques de Kampé de Fériet concernant le processus de diffusion turbulente. Dans ce travail, il prend comme point de départ un rapport de Kampé de Fériet sous le titre *Théorie de la diffusion turbulente dans un écoulement turbulent* [33]. Dans ce dernier travail, Kampé de Fériet avait établi des équations théoriques de la diffusion turbulente pour étudier la distribution d'une propriété diffusée dans un fluide homogène. Dans le cas d'une turbulence produite en soufflerie et en posant la fonction de corrélation $R(\tau) = e^{-k\tau^2}$, il avait déduit une équation de la diffusion exprimant la courbe de dispersion $\overline{y^2}$ en fonction de la distance de l'origine de diffusion ainsi que des relations entre le coefficient de diffusion turbulente (qui prend en compte pour la première fois les composantes de la viscosité pour les trois axes x, y, z) et la viscosité turbulente.

Frenkiel reprend les résultats théoriques de Kampé de Fériet et il les vérifie en traçant les courbes expérimentales de dispersion en fonction de la distance de la diffusion et celles en fonction du coefficient de diffusion turbulente et la viscosité turbulente. Enfin, il montre que ces résultats sont utiles dans divers essais expérimentaux concernant le phénomène de diffusion turbulente.

33. Le titre de ce travail est mentionné par Frenkiel dans *Application de la théorie de Kampé de Fériet aux essais sur la diffusion turbulente* (1941). Malheureusement, nous n'avons pas trouvé un document avec ce titre dans les archives de l'ONERA Lille. Cependant, un rapport de Kampé de Fériet sous le titre "Étude 13", réalisé en janvier-février 1940, mentionne les mêmes résultats de Kampé de Fériet que Frenkiel a exposés dans son travail du 1941. Dans le cadre de l'étude 13, en effet, il a "pu construire une théorie complète du phénomène [diffusion turbulente] qui est actuellement soumise au contrôle de l'expérimentation simultanément en soufflerie et dans l'atmosphère ".

Étude de la turbulence par la diffusion du gaz ammoniac

Dans cette recherche, Frenkiel mesure la turbulence en soufflerie et dans le vent naturel, en étudiant les formes et les dimensions des taches produites par le gaz ammoniac. Le dispositif expérimental utilisé est formé par un émetteur de gaz ammoniac et d'une grille disposée normalement à la direction de la vitesse moyenne. La diffusion du gaz est alors rendue apparente sur la grille sous la forme d'une tache colorée. Dans le cas de la soufflerie, il trouve que les taches colorées obtenues sont circulaires et la variation de leur rayon observé sur la grille varie avec la distance de la grille. Les données expérimentales sont en accord avec les équations théoriques de la dispersion données par Kampé de Fériet dans [Kampé de Fériet 1939a]. Dans le cas du vent, il observe des taches qui ont une forme elliptique. Ce genre de travaux sont effectués à Toulouse en 1941 et un résumé des résultats sera publié plus tard dans les Comptes Rendus de l'Académie des Sciences [Frenkiel 1946a].

Étude de la turbulence par la diffusion de la chaleur

Cette étude [Frenkiel 1946b] [34] a été conduite en collaboration avec l'Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse. Dans ce contexte, il effectue des mesures des écarts entre la température ambiante et celle présente dans le sillage d'un fil métallique chauffé électriquement, ce qui lui permet de caractériser la turbulence de l'écoulement dans lequel le fil est placé. Dans ce contexte, il montre que l'emploi d'un thermocouple permet d'explorer le sillage du fil chauffant et d'obtenir l'écart-type de la courbe de Gauss représentant la répartition des écarts suivant des droites perpendiculaires au plan formé par la direction du fil et celle de la vitesse moyenne.

L'utilisation de l'anémomètre à fil chaud

Ici Frenkiel étude le coefficient de correction I_c par lequel il faut multiplier l'intensité longitudinale (axe x) mesurée avec l'anémomètre à fil chaud de longueur négligeable pour obtenir l'intensité de la turbulence correcte. Ce coefficient est égal à la racine carré du rapport entre l'énergie E de l'écoulement turbulent et E_c la valeur de cette énergie que mesure un anémomètre à fil chaud. E et E_c sont différents à cause de l'inertie du fil et du spectre de la turbulence dans un point quelconque s de l'écoulement. Ses essais montrent que ce coefficient varie avec la longueur $\frac{M\overline{u}}{L_x}$ (M constante dépendant de l'anémomètre, L_x longueur

34. Une partie des résultats est aussi contenue dans un rapport non publié, *Mesure de la turbulence par la diffusion de la chaleur* (1942) [35] et *Calcul approché de la température d'un fil chaud à partir de la mesure de la répartition des températures dans son sillage* (1943), [Archives de l'ONERA Lille].

de corrélation et $\overline{u}$ vitesse moyenne du fluide). Il étudie également le cas où la longueur du fil chaud de l'anémomètre est non négligeable. Dans ce dernier cas, il obtient que la mesure de la corrélation, qui normalement est effectuée au moyen de deux anénomètres à fil chaud placés simultanément en deux points de l'écoulement, pourrait être effectuée aussi avec des fils de longueurs différentes expérimentés successivement. Sur ces travaux, effectués à Toulouse entre 1941 et 1943, on peut retrouver le résumé des résultats dans les *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences* [Frenkiel 1946a].

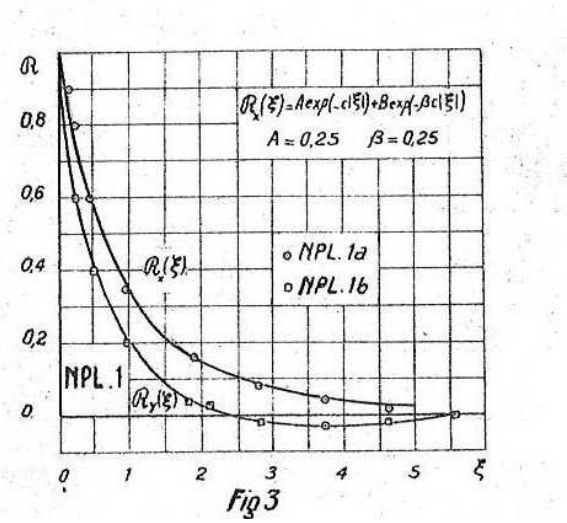


FIGURE 5.5 – Coefficient de corrélation longitudinal et transversaux mesurées par Simmons et Salter à la National Physical Laboratory (NPL). Les points expérimentaux concordent parfaitement avec les courbes théoriques déduites par Frenkiel. (N. Frenkiel, *Quelques recherches sur la turbulence*, communication ICAM 1946, [Archives de l'ONERA Lille]) .

.

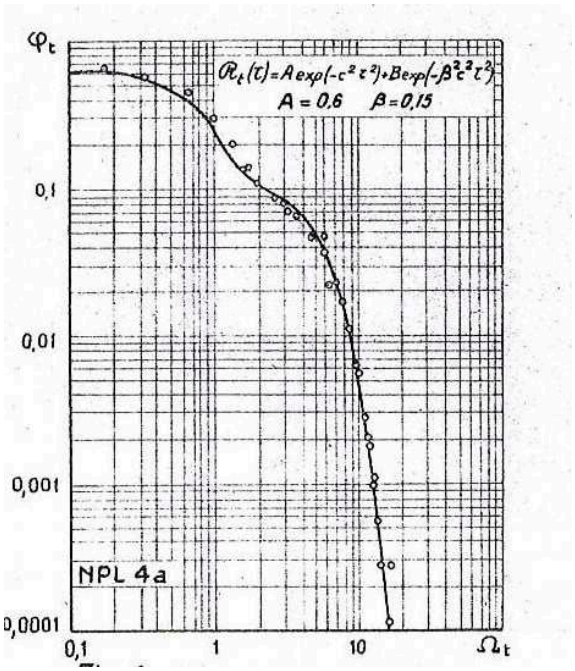


FIGURE 5.6 – Spectre de la turbulence mesuré par Simmons et Salter et accord avec la courbe correspondante à une fonction de corrélation particulière de forme exponentielle, (N. Frenkiel, *Quelques recherches sur la turbulence*, communication ICAM 1946, [Archives de l'ONERA Lille]) .

.

5.4 Conclusions

Dans ce chapitre nous avons essayé de comprendre quel a été le rôle de l'IMFL pendant le Régime de Vichy, en essayant de donner quelques éléments plus généraux touchant les autres instituts de mécanique des fluides. Dans ce contexte nous avons vu que, d'après les sources primaires consultées, les activités scientifiques des pôles de mécanique des fluides étaient conduites en clandestinité sous la tutelle du Comité d'Aéronautique géré par le G.R.A. Ensuite, nous nous sommes focalisés sur l'IMFL et sur son repli à Toulouse, où il a réalisé un laboratoire doué d'une soufflerie en bois au sein d'une chapelle. Enfin, nous nous sommes concentrés sur un collaborateur en particulier de l'IMFL, à savoir Naftali Frenkiel, un physicien polonais dont toute la recherche conduite à l'IMFL, y compris la thèse, a été effectuée en clandestinité, ce qui ne lui a pas malheureusement évité d'être déporté en 1943.

Lille fut libérée le 3 septembre 1944. A partir de ce moment-là, une partie des collaborateurs de l'IMFL et leur matériel retournèrent sur Lille alors que l'autre se dispersa dans d'autres établissements de Toulouse ou de la région parisienne (Soufflerie de Chalais-Meudon) ou dans la soufflerie de Mont Lachat (près du Mont Blanc), au moment où le G.R.A va disparaître et être remplacé par l'ONERA. La chapelle sera complètement vide à partir de 1948. Le bilan de ce repli fut positif d'après le conseil d'administration de l'IMFL qui se réunit à Lille le 22 décembre 1944 :

> "Le but essentiel de cette évacuation était de mettre le personnel, les archives et une partie du matériel, hors des emprises de l'ennemi ; ce but a été pleinement atteint". [36]

Une fois à Lille, l'IMFL consacra tous ses efforts pour faire redémarrer les enseignements suspendus pour l'année scolaire 1944/1945. En ce qui concerne la recherche, il s'engagea immédiatement dans la remise en marche des locaux de l'institut, dégradés par quatre années d'occupation, de vols et de dégradations. Le conseil commente la situation des locaux avec les mots suivants :

> "il faut à tout prix sauver ce qui reste, le remettre en état, dresser l'inventaire minutieux des portes ; les bâtiments sont ouverts à tous les vents, la pluie ruisselle sur les installations électriques, intactes encore il y a quelques semaines ; sur certains tableaux (facturés 600.000 Fr en 1934) on voit tous les jours s'étendre les ravages de la rouille ; chaque journée qui passe cause des dégâts irréparables " [37]

36. Procès-verbal de Réunion de la Commission permanente du Conseil d'Administration de l'Institut de Mécanique des fluides en date du 22 décembre 1944, [Archives de l'ONERA Lille].
37. Procès-verbal de Réunion de la Commission permanente du Conseil d'Administration de

Quant à Kampé de Fériet, il rentrera à Lille durant les premiers mois de 1945 et il donnera sa démission en juillet pour se consacrer exclusivement à la recherche théorique à la Faculté des Sciences de Lille. La date de la visite d'adieux de Kampé de Fériet à l'IMFL, le 3 juillet 1946, coïncide très probablement avec celle de la soutenance de thèse de Naftali Frenkiel [38] [Figure 5.7]. Martinot-Lagarde lui succédera à la tête de l'IMFL et donnera à l'institut un caractère encore plus expérimental de celui de son prédécesseur. Suite au départ de Kampé de Fériet et de Frenkiel, les recherches théoriques sur la théorie de la turbulence n'occuperont plus une place privilégiée au sein des activités de l'IMFL. Les travaux de l'institut seront consacrés plutôt à la mécanique des maquettes libres, aux écoulements transsoniques ainsi qu'à d'autres problèmes liés à l'aéronautique et à l'économie régionale notamment des problèmes concernant la ventilation, l'aérage, le transport pneumatique, l'influence du vent sur les constructions et l'épuration de l'eau [Martinot-Lagarde 1968].

La plupart de ce que nous avons présenté dans ce chapitre est révélé dans des discours des acteurs, discours qui sont contenus principalement dans les rapports des activités du comité d'Aéronautique et de l'IMFL. En effet, les limites des sources d'archives ne permettent malheureusement pas d'avoir un regard plus critique à l'égard de cette histoire et des points de vue des acteurs. Une masse plus importante de documents aurait pu permettre une analyse plus étayée et plus objective de cette histoire, qui aurait pu clarifier la mesure dans laquelle ces travaux ont été effectivement menés en clandestinité sans aucune liaison avec les militaires. Cette analyse aurait donc permis de comprendre quel est le vrai but du G.R.A et du comité d'Aéronautique ainsi que les raisons pour lesquelles ces deux institutions conduisaient ce type de travaux. Nous avons vu que les témoignages de Kampé de Fériet dans sa lettre adressée à l'Institute of the Aeronautical Sciences et les travaux de Frenkiel font clairement référence à cette condition de clandestinité. A ce propos, le président du G.R.A, Raymond Poincaré écrit les mots suivants dans une note envoyée à l'IMFL le 9 novembre 1944 :

> "Aucune recherche aéronautique n'aurait dû être faite qui ne soit autorisée par les occupants, et dont les résultats soient intégralement communiqués aux Allemands. Pourtant, pendant quatre ans nous avons pu poursuivre nos recherches sans que personne vienne jeter un regard indiscret sur nos travaux. [...] Le but que le G.R.A s'était assigné depuis l'année 1940, c'était de maintenir l'équipe de chercheurs en haleine,

l'Institut de Mécanique des fluides en date du 22 décembre 1944, [Archives de l'ONERA Lille].

38. Il s'agit d'une donnée repérée par les témoignages de Maurice Dubois qui est à vérifier car nous n'avons pas trouvé des documents officiels sur sa soutenance. Lettre de Maurice Dubois à M. Jean Luc Charles, le 13 avril 2004, [Archives de l'ONERA Lille].

> tout en faisant progresser dans l'ombre nos connaissances sur les problèmes d'aéronautique. Le G.R.A voulait que sans retard cette équipe puisse reprendre activement le travail au grand jour de la libération ; il voulait aussi, pourquoi ne pas l'avouer, conserver une dernière carte à jouer en cas d'une issue du conflit qui ne rende pas à la France sa pleine liberté d'action en matière d'aviation, et que le Pays dispose d'un organisme privé tout prêt à camoufler sous la bannière de la recherche scientifique la renaissance de l'Aviation Française." [39]

Ces témoignages explicitent clairement une situation où le personnel de l'IMFL et du G.R.A ont vécu une expérience de clandestinité dans la poursuite de leurs recherches pendant l'occupation. Cependant, à l'exception de Frenkiel dont cette condition est évidente, pour les autres cas les limites des sources nous obligent à une reprise des discours des acteurs sans pouvoir prendre de recul.. Et cette reprise des discours pourrait, dans certains cas, donner un récit qui ne correspond pas à la réalité. Ces doutes sont encore plus forts lorsque l'on réfléchit sur le rôle joué par l'armée de l'Air pendant le régime de Vichy, rôle analysé par l'historienne Claude d'Abzac-Epezi dans sa thèse *L'Armée de l'air de Vichy, 1940-1944* [d'Abzac Epezy 1997]. En exploitant les archives du service historique de la défense, elle décrit comment l'armée de l'Air s'inscrit dans les différents projets de collaboration militaire qui rythment les rapports franco-allemands, en dressant une histoire de cette armée qui est loin de correspondre à celle diffusée par les témoignages officielles. Son analyse met en lumière qu'il y a, depuis juin 1940, une collaboration effective dans le domaine de la défense aérienne du territoire. Là, elle montre non seulement une implication très importante des ministres de l'Air ayant en charge durant cette période - le général Jean-François Jannekeyn de 1942 à 1944 - mais aussi l'existence d'une collaboration dans l'industrie aéronautique entre la France et l'Allemagne nazie. Même si cette thèse ne traite pas le rôle du G.R.A et des instituts de mécanique des fluides pendant l'occupation allemande, elle nous donne des éléments de réflexion très importants, capables de mettre en discussion les points de vue des acteurs présentés dans ce chapitre et qui pourraient donner naissance à un travail ultérieur sur ce sujet.

Toutefois, au-delà de toutes ces questions laissées ouvertes, ce chapitre aura, nous l'espérons, pu apporter quelques petits éléments de plus à cette histoire encore presque inconnue.

39. Note du directeur du G.R.A pour le personnel de l'IMFL, le 9 novembre 1944, [Archives de l'ONERA Lille].

FIGURE 5.7 – Visite d'adieux de Kampé de Fériet, 3 juillet 1946.
(les personnes du premier rang ont leurs noms en gras) :
Maurice DUBOIS - **Michel OLIVE** - Mme ROLLIN - Joseph STANKIEWICZ - **Naftali FRENKIEL** - Gaston HELVIG - Lucien BEAURAIN - Julien OCHIN - **Maurice DAMIENS** - Paul MASSEMYN - Michel KdF (Kampé de Fériet ?) - **J. KAMPE de FERIET** - Joseph PAURICHE - André FAUQUET - **François WARLOP** - Jean GOBELTZ - **A. MARTINOT-LAGARDE** - Stéphane STANKIEWICZ - Gilbert VANSTEENKISTE - **Georges OLIVE** - Gérard GONTIER - Pierre GRYSON - Jules TOILLIEZ.
"Le bâtiment, abîmé par la guerre, était en cours de restauration. Le bureau, fissures replâtrées, n'avait pas encore été repeint". Il ne s'agit qu'une partie des collaborateurs de l'IMFL comprenant ingénieurs, techniciens et physiciens. Les autres sont encore à Toulouse. Photo et légende contenues dans la lettre de Maurice Dubois du 13 avril 2004, Départ de Monsieur Kampé de Fériet, [Archives de l'ONERA Lille].

Conclusions générales et perspectives

> Is fluid dynamics at the beginning of the twenty-first century still the same twin-discipline as it was a hundred years ago ? Is what was then labeled as hydrodynamics versus hydraulics, reappearing as physical versus engineering fluid dynamics ? Are we witnessing merely the old schism between theory and practice in a new guise ?
>
> Michael Eckert (2007)

Joseph Kampé de Fériet s'avère être un personnage-clé dont la trajectoire apporte des éléments de réponse aux questionnements posés en introduction de cette thèse concernant l'état de la mécanique des fluides française de la première moitié du XX ^{e} siècle. Ses identités : mathématicien, expérimentateur et directeur d'une institution scientifique, ont mis en lumière quelques aspects théoriques, expérimentaux (et instrumentaux) et institutionnels propres à ce domaine concernant la théorie de la turbulence, l'aérodynamique balistique, la théorie de la résistance d'un fluide parfait et les solutions exactes des fluides visqueux. Inspirée par le travail de [Eckert 2007] sur la mécanique des fluides allemande autour de Prandtl, la thèse a décrit et mis en valeur le cas français à partir du parcours scientifique et institutionnel de Kampé de Fériet. En s'appuyant sur les propositions méthodologiques de Sigmunde-Schultze [Siegmund-Schultze 2003b], nous avons construit une histoire fondée sur l'enchaînement de trois périodes : l'entre-deux-guerre et les deux guerres mondiales, qui a fait ressortir l'importance des interactions entre le monde académique, l'industrie et les institutions militaires au sein de ce domaine et, plus généralement, des mathématiques appliquées françaises et des canaux de communication entre les mathématiques pures et les divers champs d'application de la mécanique des fluides ainsi que de la balistique. Plus précisé-

ment, d'une part le travail d'Eckert nous a suggéré la voie à suivre pour aborder les multiples aspects de la mécanique des fluides, qui consiste à s'appuyer sur l'engagement scientifique et institutionnel d'un acteur particulier pour tenter de mieux cerner les enjeux principaux de la mécanique des fluides française entre 1915 et 1945. D'autre part, les remarques méthodologiques de Sigmund-Schultze nous ont permis de justifier une écriture de l'histoire de la mécanique des fluides non restreinte à la période de paix entre 1919 et 1939 mais incluant les deux périodes des guerres mondiales, ces dernières étant considérées comme deux événements cruciaux pour comprendre la période de l'entre-deux-guerres au sens strict du terme. La première guerre mondiale est importante pour comprendre de quelle manière les collaborations entre mathématiciens et militaires peuvent être décisives pour orienter l'intérêt des mathématiciens académiciens vers les mathématiques appliquées et/ou leur institutionnalisation ainsi que vers d'autres formes nouvelles de collaborations extra-universitaires notamment avec les industriels et la société locale ou encore avec des physiciens et des ingénieurs. Dans ce travail nous avons essayé de faire ressortir cette continuité dans le cas de la mécanique des fluides. Ainsi, pour comprendre la mécanique des fluides de l'entre-deux-guerres, il est donc fondamental de comprendre ce qui se passe pendant la première guerre mondiale. Nous avons découvert, lors de ces recherches, que la mobilisation scientifique des mathématiciens dans les institutions militaires comme celle Gâvre et par la suite leurs contributions en balistique peuvent être vues comme une anticipation de ce qui se passera par exemple dans la mécanique des fluides après la guerre. En ce qui concerne la seconde guerre mondiale, l'étude de cette période a été fondamentale pour comprendre l'évolution des canaux de communication entre le Ministre de l'Air et le réseau des instituts de mécanique des fluides pendant l'occupation ainsi que l'influence de la guerre sur la poursuite et l'évolution des travaux de mécanique des fluides.

Le cas français, presque oublié par la littérature internationale secondaire, apparaît comme un cas d'étude digne d'intérêt à l'instar des cas américain, anglais, allemand et russe. L'évocation d'une multiplicité d'acteurs, d'institutions, et des pratiques hétérogènes adoptées allant des plus théoriques aux plus expérimentales, dressent un paysage français très dynamique, qui participe activement à l'évolution du domaine tant à l'échelle nationale qu'internationale. En particulier, la théorie de la turbulence se révèle être un sujet crucial pour mettre en lumière le fait que même la France est impliquée dans les changements profonds qui traversent la mécanique des fluides dans les années 1920-1940, marqués par un rapprochement progressif de la théorie à la pratique. C'est dans ce contexte que le cas de l'Institut de Mécanique des Fluides de Lille est un exemple éclairant qui permet de révéler l'existence, en France, de laboratoires de mécanique des

fluides qui réussissent à tisser un dialogue fructueux entre mathématiques et expérimentation, entre mathématiciens et physiciens/ingénieurs.

Si cette transdisciplinarité de la mécanique des fluides apporte une grande richesse aux contenus de notre travail, elle soulève aussi des difficultés liées aux concepts de "communauté" et d'"école". La communauté de la mécanique des fluides française, structurée autour de chaires et d'instituts soumis à une politique d'étatisation gérée par le ministre de l'Air et composée de scientifiques et d'ingénieurs provenant de milieux sociaux différents, ne peut pas être linéairement définie par les définitions de communauté scientifique existantes. Plus précisément, la définition de la notion de communauté utilisée en histoire des mathématiques ne considère pas la composante expérimentale des laboratoires de mécanique des fluides alors que la définition utilisée en histoire des sciences accorde peu d'importance à la composante mathématique. De plus, l'existence de la revue *Publications scientifiques et techniques du Ministère de l'Air*, qui devrait légitimer la notion de communauté, présente des aspects paradoxaux car elle est utilisée presque exclusivement pour des travaux expérimentaux et laisse peu de place aux travaux théoriques, qui sont plutôt publiés dans les revues de physique et mathématiques ou dans les *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*. Il en est de même pour la définition de la notion d'école, comme nous l'avons observé dans le cas de l'école de Wehrlé et Dedebant. Enfin, le caractère complexe et hétérogène de cette trandisciplinarité se reflète également dans les modèles d'organisation du travail collectif et dans la compréhension de la place de l'ingénieur au sein du laboratoire de mécanique des fluides. Nous avons en effet rencontré, lors de ce travail, plusieurs profils différents d'ingénieurs : d'abord les ingénieurs issus de l'IDN faisant partie du personnel de l'IMFL qui consacraient leurs activités aux travaux de recherches et aux essais concernant l'aérodynamique appliquée à l'aviation ou de mécanique des fluides expérimentale alors que les travaux théoriques étaient effectués par Kampé de Fériet et son élève mathématicien Ratib Berker. Il y a ensuite les polytechniciens officiers militaire membres de la Commission de Gâvre ainsi que les polytechniciens de l'ONM (Philippe Wehrlé et Georges Dedebant) et de l'Institut de Mécanique des Fluides de Paris avec une solide formation mathématique, ce qui leur a permis d'élaborer des théories de balistique et de mécanique des fluides assez sophistiquées. Enfin nous avons aussi vu les ingénieurs en Allemagne et aux États-Unis dont leurs compétences mathématiques et expérimentales ont suscité une recherche entre théorie et pratique qui a ouvert les portes à une nouvelle manière de faire la mécanique des fluides. L'étude du statut de l'ingénieur dans le domaine de la mécanique des fluides est donc très complexe car il se place entre l'être théoricien et l'être expérimentateur et semble dépendre, parmi les autres facteurs, des conditions préalables nationales mais

aussi locales.

D'un point de vue plus général, au-delà de l'histoire de la mécanique des fluides, notre travail retrace la manière dont évoluent les mathématiques appliquées au cours de la première moitié du XX e siècle. Le rôle militaire des mathématiciens de la Commission de Gâvre, examiné dans le chapitre 1, a mis en évidence la façon avec laquelle ils ont appliqué leurs connaissances en mathématiques pures pour faire progresser la balistique du double point de vue analytique et numérique, ainsi que les éléments de continuité entre la guerre et le paysage mathématique moderne, au sein duquel les mathématiciens ont dirigé encore plus leur attention vers les mathématiques appliquées et leur institutionnalisation. Dans le chapitre 4, nous avons approfondi cet aspect dans le cas spécifique de la mécanique des fluides de l'après-guerre. Là, l'étude de la mathématisation de ce domaine par Villat et Kampé de Fériet a mis en lumière l'existence de profils intéressants de spécialistes de mathématiques appliquées, qui se distinguent par leurs approches plus au moins dirigées vers la composante applicative ou vers la consolidation des aspects théoriques d'un problème, leurs outils mathématiques, leurs sujets de recherche. Les chapitres 1 et 4 ont été développés autour de la même question : jusqu'à quel point la mathématisation d'un domaine extra-mathématique telle que la balistique ou la mécanique des fluides a-t-elle été utile aux finalités des ingénieurs et des applications ? Cette question a permis de donner une place importante, dans notre étude, aux mathématiques pures et à leurs applications. Ainsi, pour le cas de la balistique, nous avons pu aborder : les applications de la théorie des fonctions analytiques, de la théorie de Galois, des fonctions spéciales comme les fonctions elliptiques et hypergéométriques et des méthodes numériques. Pour le cas de la mécanique des fluides, nous avons plutôt présenté les applications de divers théorèmes de l'analyse complexe et les transformations conformes ainsi que la théorie des fonctions aléatoires en calcul des probabilités. L'utilisation de ces outils mathématiques montre l'importance du rôle joué par les mathématiques pures dans la mathématisation de la mécanique des fluides et de la balistique. Ainsi, dans le même esprit que [Leloup 2009] et la conférence Oberwolfach sous le titre "From "Mixed" to "Applied" Mathematics : Tracing an important dimension of mathematics and its history", notre travail s'inscrit dans une historiographie des mathématiques appliquées qui ne laisse pas les mathématiques pures dans l'ombre, mais qui les fusionne.

Au-delà de la question de la mathématisation de disciplines techniques comme la balistique et la mécanique des fluides, cette thèse soulève aussi la question de l'implication des mathématiciens dans les travaux expérimentaux en prenant le cas de Kampé de Fériet. Ce sont surtout ses techniques d'enregistrements pho-

tographiques et cinématographiques mises en place en collaboration avec des physiciens, ingénieurs et officiers militaires qui mènent à considérer ce mathématicien comme un bon expérimentateur. Dans le chapitre 1, nous avons vu en effet, sa contribution à la balistique expérimentale pendant sa mobilisation à Gâvre concernant les techniques d'enregistrement photographique des vitesses d'un projectile et la conception ainsi que le perfectionnement de l'appareil utilisé pour l'emploi de cette technique, travail effectué en collaboration avec Gabriel Foex pendant la guerre et poursuivi pendant les années 1920 en tant que membre assistant de la Commission de Gâvre. Dans ce contexte, nous avons vu aussi des réseaux entre mathématiciens et officiers militaires très explicites car il s'agit d'un travail demandé par la commission de Gâvre et auquel les officiers militaires contribuent, collaborant avec lui et Foex pour faire progresser ce type de recherche. En effet, si le premier appareil (juin 1918) est une installation rudimentaire réalisée par Foex et Kampé de Fériet pour tester leur méthode, le deuxième appareil, plus sophistiqué, a été construit à Gâvre par les officiers militaires de l'Atelier de la Direction de l'Artillerie Navale de Lorient alors que le troisième appareil a été fabriqué par la Section Technique de l'Artillerie de Paris. Cette collaboration s'exprime aussi par le fait que les tirs de canons nécessaires à recueillir leurs résultats expérimentaux visant à perfectionner le dispositif ont continué à être effectués au polygone de Gâvre même après la guerre. Ces travaux, publiés dans les *Mémorial de l'Artillerie Française*, ont eu un succès non négligeable chez les militaires. Dans le chapitre 3, nous avons montré que le profil de Kampé de Fériet en tant qu'expérimentateur ne se limite pas aux questions militaires mais il continue à travers une série de travaux conduits pendant sa direction de l'IMFL concernant les techniques cinématographiques destinées à l'étude du mouvement des nuages, travaux qui ont suscité l'intérêt des ingénieurs aéronautiques et des spécialistes de météorologie autour de la commission internationale d'étude du vol sans moteur (ISTUS) présidée par le professeur allemand Walter Georgii. Ces techniques se révéleront très utiles dans la réalisation des prises de vues du ciel et l'étude des conditions météorologiques lors des campagnes aérologiques de la Banne d'Ordanche organisées par la Commission de la Turbulence Atmosphérique. Pendant cette période, son rôle d'expérimentateur transparaît également dans sa participation active aux travaux en équipe visant à légitimer du point de vue expérimental les idées théoriques de Wehrlé et Dedebant et, de manière moins explicite, dans d'autres campagnes aérologiques comme celle du Sahara ainsi qu'en laboratoire lors de la mise au point de l'appareillage scientifique destiné à ces campagnes (l'anémoclinomètre IMFL) et d'autres travaux effectués par le Service Technique des Recherches Scientifiques de l'Aéronautique (STAe) comme les essais concernant les sondes de pression statique.

Le concept du prisme constitué par l'enchevêtrement des trois identités de

Kampé de Fériet (directeur, expérimentateur et mathématicien) et mis en place pour développer ce sujet de recherche peut tout naturellement conduire à la question suivante : jusqu'à quel point la vision de la mécanique des fluides est-elle déformée par l'examen du cas lillois ? La réponse à cette question repose sur la fonction qu'occupe le concept du prisme : ce n'est pas celle de faire ressortir des éléments de la mécanique des fluides restreints au cas lillois, mais c'est plutôt celle d'examiner un contexte plus large qui est autour du cas lillois, dans une perspective qui va du cas particulier au cas plus général : c'est le jeux d'echelle suggéré par [Revel et des hautes études en sciences sociales 1996], c'est l'harmonisation du cas particulier avec un contexte plus général autour de ce cas qui conduit à une meilleure compréhension des problématiques-clés de la mécanique des fluides au XX^{e} siècle. En même temps, cette harmonisation est attentive à envisager Kampé de Fériet et l'IMFL non pas comme des éléments représentatifs du domaine mais comme des éléments-clé à partir desquels appréhender un contexte plus général. Plus précisément, la région détectée par le prisme contient des éléments qui sont propres au cas lillois et des éléments qui sont plus généraux impliquant d'autres contextes qui ont des liens directs et indirects avec la trajectoire de J. Kampé de Fériet et l'IMFL. Ce sont en effet ces liens qui définissent les limites de l'entourage mis en relief par le prisme, un entourage qui prend en compte des éléments tant dans le contexte national qu'international.

Pour décrire cet entourage à partir des liens directs et indirects avec Kampé de Fériet, nous avons eu recours à des documents qui concernent le cas lillois et surtout les cas non lillois. Il s'agit de documents institutionnels, publications scientifiques, manuscrits, lettres, notes techniques, articles et livres d'histoire des sciences qui concernent des acteurs et des institutions qui font partie des milieux parisien, américain, anglais, allemand mais aussi russe et italien, et plus généralement des acteurs qui font partie du contexte international autour des ICAM, congrès qui à l'époque représentaient un des plus importants lieux d'échanges scientifiques entre les divers spécialistes de la mécanique des fluides provenant de différents pays. La recherche et la consultation du matériel nécessaire pour le développement du sujet a été une étape très importante dans ce travail. Il a fallu presque une année et demie pour recueillir tous les documents nécessaires pour le travail étant donné que ce dernier s'appuie sur un grand nombre de documents d'archives délocalisées dans diverses villes françaises et à l'étranger. A ce travail, il faudra également ajouter le temps nécessaire pour effectuer une analyse mathématique de la production scientifique des acteurs envisagés, sans oublier que cette production concerne des sujets de la mécanique des fluides dont les difficultés techniques ne sont pas négligeables. Nous pouvons penser à ce propos à la théorie de la turbulence et à son étude avec une approche statistique et probabiliste.

Ainsi, à partir des contributions de Kampé de Fériet à la mécanique des fluides théorique et expérimentale entre 1929 et 1945, notre analyse micro-historique a permis d'évoquer un grand nombre d'acteurs français et étrangers qui sont en relation avec son travail et liés à son rôle institutionnel, en déplaçant le centre d'intérêt de la vie scientifique et institutionnelle de Kampé de Fériet à la vie scientifique et institutionnelle d'autres acteurs, en reconstruisant leurs parcours biographiques, leur rôle au sein de leur milieu universitaire et/ou extra-universitaire ainsi que leurs contributions à la mécanique des fluides en relation avec Kampé de Fériet. A titre d'exemple, nous pouvons mentionner le mathématicien turque Ratib Berker, le physicien Naftali Frenkiel, les mathématiciens et les officiers de la Commission de Gâvre, les spécialistes de la mécanique des fluides autour des ICAM (Taylor, von Kármán, Prandtl, Wiener) qui ont inspiré les travaux de Kampé de Fériet sur la théorie statistique de la turbulence, les collègues de von Kármán à Caltech avec lequel Kampé de Fériet travaillait et échangeait ses idées, Henri Villat et sa mathématisation à la française qui diffère de celle de Kampé de Fériet, l'école d'Henri Villat etc.

Ainsi, avec ce point de vue, le concept du prisme peut être utilisé pour montrer que certaines problématiques-clés de la mécanique des fluides peuvent être abordées non seulement dans le cas des États-Unis, de l'Allemagne, de la Russie et du Royaume-Uni mais aussi dans le cas de la France. C'est aussi dans ce sens-là que ce concept de prisme se propose non pas de réaliser une biographie ou l'histoire d'un institut mais l'histoire d'une discipline, en essayant de répondre à des questions plus générales du domaine à partir de l'examen d'un cas particulier autour de Kampé de Fériet. Et ces cas particuliers sont l'IMFL dans le chapitre 2, la turbulence en France dans le chapitre 3, et l'approche probabiliste à la turbulence dans le chapitre 4. Prenons comme exemple le cas du chapitre 3. Ici, la question des tensions et des rapprochements entre théorie et pratique est une question qui a été traitée par Eckert dans le cas de la mécanique des fluides allemande et qui impliquait les nouvelles théories comme la couche limite, la turbulence et la dynamique des gaz. Dans ce contexte, nous nous sommes demandés si cette problématique affectait également la France et si oui, dans quelle mesure par rapport aux autres pays. Ici, en réduisant la focale à la théorie de la turbulence, le concept du prisme a fait ressortir le fait que l'école de Wehrlé et Dedebant au sein de la Commission de la Turbulence Atmosphérique (école dont Kampé de Fériet faisait partie en tant qu'expérimentateur) est un exemple prouvant que même en France, il existait des acteurs ayant changé la façon d'aborder les problèmes de la mécanique des fluides à l'aide de la statistique et du calcul des probabilités, en réalisant des théories toujours plus applicables. Ce type de questions nous a

donné le prétexte pour dresser une histoire de la turbulence française oubliée par l'historiographie actuelle.

L'ensemble d'exemples illustrés dans cette thèse montre que les choix méthodologiques adoptés, si nous faisons attention à distinguer ce qui est propre au cas lillois de ce qui ne l'est pas, pourrait être une possible première approche à l'étude de l'histoire d'une discipline dont une étude structurale, une historiographie est encore absente pour le XX^{e} siècle. Ce travail peut être donc considéré comme une première étape d'une étude plus structurale. Et il permet aussi de comprendre les enjeux entre la mécanique des fluides et les mathématiques appliquées. Le but est de faire ressortir la complexité de la transdisciplinarité et de la polycentricité de ce domaine à travers des questions-clés, plutôt que de se limiter à dresser une histoire globale du domaine qui risquerait justement de perdre de sa complexité.

Même si ce travail ne se propose pas de faire une biographie de Kampé de Fériet, nous pouvons cependant remarquer la présence d'un grand nombre d'éléments biographiques très précieux concernant la vie scientifique et institutionnelle de ce mathématicien et qui sont dispersés tout au long des cinq chapitres. Nous avons en effet examiné les raisons pour lesquelles pendant la guerre de 1914 il commence à s'intéresser à l'hydrodynamique ainsi que son parcours de formation en analyse autour de Paul Appell et des autres professeurs de la Sorbonne. Nous avons aussi mis en évidence les motifs pour lesquels il est devenu si jeune directeur de l'IMFL même si la période entre son travail en aérodynamique balistique de 1918 et sa publication ultérieure en hydrodynamique en 1929 semble être "vide" en ce qui concerne ce domaine et ses échanges scientifiques avec Henri Villat, celui qui dirigera l'intérêt du ministre de l'Air vers les travaux de balistique de Kampé de Fériet effectués pendant sa mobilisation à la Commission de Gâvre. Nous avons ensuite d'une part justifié pourquoi ce mathématicien peut être considéré un bon expérimentateur dans le cadre des techniques d'enregistrements photographiques et cinématographiques appliquées à la balistique expérimentale et à la turbulence atmosphérique ainsi que dans le travail au laboratoire ; d'autre part nous avons analysé sa manière de mathématiser des problèmes de la mécanique des fluides à l'aide de l'analyse, du calcul des probabilités et de l'algèbre, ainsi que les différences et les analogies avec la manière de mathématiser d'Henri Villat. Nous avons également essayé de comprendre les raisons pour lesquelles il a commencé à s'intéresser à la théorie de la turbulence à partir de 1933 et qui l'ont dirigé vers une approche probabiliste de ce domaine particulier de la mécanique des fluides. Enfin, nous avons aussi discuté son rôle au sein du milieu américain autour de von Kármán, de la Commission de la Turbulence Atmosphérique ainsi que son engagement dans la construction d'un laboratoire expérimental à l'intérieur d'une

chapelle toulousaine pendant le repli de l'IMFL entre 1940 et 1945.

Cette thèse ouvre quelques perspectives de recherche envisageables dans la continuité de notre travail. Nous espérons en effet avoir jeté les bases pour parvenir à une connaissance plus profonde et plus large de l'état de la mécanique des fluides en France pendant la période envisagée. Ces perspectives s'inscrivent dans la prise en compte de aspects faiblement détectés par le prisme de Kampé de Fériet et qui nécessitent d'être approfondis.

Une première perspective suggérée par notre travail pourrait être l'examen d'autres sujets de recherche en mécanique des fluides et d'autres institutions de mécanique des fluides encore peu explorés, comme par exemple l'étude des phénomènes de choc et des écoulements à grande vitesse à l'Institut de mécanique des fluides de Marseille (IMFM). Cet institut, dont l'histoire est quasiment inconnue, au contraire de celle des centres de Paris et de Toulouse [Charru 2017–08], [Fontanon 2017], disposait d'une soufflerie à grande vitesse ainsi que d'un important centre de recherche concernant la détermination des ondes de choc dans les écoulements stationnaires autour d'un obstacle conduit par Henri Cabannes (1923-2016), un mathématicien et étudiant de Villat qui faisait partie de l'équipe de l'IMFM. Pendant les années 1930-1950, ce sujet a constitué un centre d'intérêt dominant au sein de la communauté internationale de mécanique des fluides, à l'instar de l'écoulement d'un fluide visqueux et de la théorie de la turbulence. Cette piste nécessiterait d'être approfondie car elle permet d'ouvrir de nouveaux axes de recherche et de nouvelles problématiques propres à la mécanique des fluides qui se développent autour d'autres acteurs comme Dimitri Riabouchinsky à Paris, Arturo Crocco en Italie, James Lighthill en Royaume-Uni etc. Dans ce contexte, une trajectoire très intéressante à étudier serait celle du directeur de l'IMFM, Joseph Pérès, que nous n'avons que mentionné lors de notre thèse, sans analyser dans le détail sa contribution et son approche à la mécanique des fluides. Sa collaboration avec Lucien Malavard et son parcours scientifique et institutionnel autour des techniques analogiques dans la résolution des problèmes de mécanique des fluides, d'élasticité, d'électrostatique et de magnétisme pourrait apporter, de la même façon que les cas d'Henri Villat et de Kampé de Fériet analysés dans cette thèse, des éléments très précieux pour la compréhension de la complexité du paysage mathématique moderne et de son spectre continu allant des mathématiciens moins appliquées aux plus appliquées.

Une seconde perspective susceptible d'enrichir notre travail concerne des travaux ultérieurs destinés à assurer une plus grande clarté et des éclaircissements supplémentaires pour certaines questions laissées, malheureusement, sans ré-

ponse à cause du manque de sources primaires et secondaires. Par exemple, le cas de la mécanique des fluides pendant la seconde guerre mondiale a apporté moins de réponses qu'il n'a laissé de questions ouvertes. Le manque de sources empêche de comprendre le rôle du GRA pendant la seconde guerre mondiale, les raisons pour lesquelles Kampé de Fériet a quitté l'institut après la guerre (peut-être avait-il entrepris des formes de collaborationnisme, ou peut-être souhaitait-il simplement se consacrer pleinement à la recherche théorique) et les liens entre l'IMFL et l'institut de Mécanique des Fluides de Toulouse. Dans ce contexte, la recherche en mécanique des fluides semble se dérouler cachée de l'ennemi, dans une logique de poursuite des travaux entamés avant la guerre. Toutefois, un travail ultérieur pourrait faire ressortir des éléments qui peuvent remettre en cause cette condition de clandestinité, en mettant en évidence des possibles canaux de communication entre les instituts et le milieu militaire et une recherche de la mécanique des fluides en relation avec la balistique et d'autres technologies militaires. Nous n'avons par ailleurs que des réponses peu claires sur des questions comme les rôles relatifs des mathématiciens et des physiciens ainsi que le paysage de la mécanique des fluides avant la création des instituts de mécanique des fluides, caractérisé par la présence d'un grand nombre de champs d'applications hors de l'aéronautique, notamment l'hydraulique, la météorologie, la balistique, l'astronomie etc.

A ces perspectives, nous pouvons en ajouter d'autres qui s'inscrivent dans le contexte de la mécanique des fluides après la seconde guerre mondiale, à propos de laquelle la littérature secondaire est presque inexistante. Comme les autres domaines des mathématiques appliquées [Higham 2015], la mécanique des fluides est impliquée dans un mouvement très fort d'internationalisation, caractérisé par l'arrivée des ordinateurs et du calcul digital, et qui a comme épicentres d'une part les États-Unis, et de l'autre la Russie. L'évolution des congrès ICAM en IUTAM (International Congress of Theoretical and Applied Mechanics), la naissance d'organisations comme la Division of Fluid Mechanics au sein de l'American Physical Society et des premiers journaux internationaux de mécanique des fluides vont nourrir le cadre institutionnel existant. La mécanique des fluides, étudiée désormais aussi à l'aide de l'ordinateur, élargit son champ d'application à d'autres disciplines en dehors de l'aéronautique et l'hydraulique, notamment l'astronomie, la géophysique, l'océanographie et la météorologie. Là, elle consolide avec ces différents domaines les premiers liens établis dès avant la guerre, comme nous l'avons vu pour le cas de la météorologie à l'Office National Météorologique sous la direction de Wehrlé. Cette ouverture à d'autres disciplines et ce renouvellement des institutions se reflètent par exemple dans le colloque international sous le titre "Mécanique de la Turbulence" organisé à l'occasion de l'inauguration de l'Institut de mécanique statistique de la turbulence de Marseille (ISMT) du 28 août au 2

septembre 1961 suivi par un seconde colloque "les problèmes fondamentaux de la turbulence et leurs relations avec la géophysique " organisé par l'International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG) et l'International Union for Theoretical and Applied Mechanics (IUTAM) du 4 au 9 septembre 1961. Ces deux événements, qui marqueront l'histoire de la mécanique des fluides internationale de l'après-guerre, montrent non seulement que la théorie de la turbulence était à cette époque un champ de recherche très actif et trandisplinaire mais ils mettent aussi en évidence l'émergence de la nouvelle génération des spécialistes de mécanique des fluides qui se superpose à celle plus ancienne de l'entre-deux-guerres. Ainsi, à côté de von Kármán et Joseph Pérès en qualité de présidents honoraires du colloque, Kampé de Fériet en qualité de membre du comité scientifique, Kolomogorov en qualité d'intervenant, et Taylor en qualité de participant nous pouvons trouver un grand nombre de jeunes spécialistes qui joueront un rôle fondamental pendant les années 1950-1970 : Alexandre Favre, Alexandre Obukhov, Georges Batchelor, Naftali Frenkiel, Antoine Craya, Jean Bass, Hans Liepmann, Hermann Schlichting etc. [40] L'analyse du binôme colloque-symposium organisé au sein de l'ISMT pourrait être un bon point de départ pour développer une étude à propos de la communauté internationale de mécanique des fluides de cette époque.

En ce qui concerne les premiers journaux internationaux de mécanique des fluides, ceux-ci remontent aux années 1950. En 1956, le mathématicien et disciple de Taylor, George Batchelor (1920-2000), fondera à Cambridge le *Journal of Fluid Mechanics* (JFM), un journal anglo-américain dirigé par deux éditeurs associés issus de l'université de Princeton (W. C Griffith) et de Harvard (Georges Carrier), qui s'adresse à la communauté internationale de mécanique des fluides tout entière. Deux ans plus tard, Naftali Frenkiel, qui, après son expérience à l'IMFL, est nommé professeur à la John Hopkins University et secrétaire de la Division of Fluid Dynamics of the American Physical Society (DFD), fondera une deuxième revue, *The Physics of Fluids* (1958). Cette revue soulèvera une importante polémique entre Frenkiel et Batchelor, à propos de laquelle ce dernier se montrera "consterné et perturbé" à l'égard de la coexistence des deux revues au sein de la communauté internationale de mécanique des fluides. Ainsi, Batchelor proposera à Frenkiel une division du travail : le *Journal of Fluid Mechanics* pourrait s'occuper des aspects mécaniques du mouvement du fluide alors que le journal *Physics of Fluid* se concentrerait plutôt sur les aspects physiques du mouvement. Cependant, Frenkiel répondra "qu'il n'a aucune autorité pour s'imposer sur la politique éditoriale de la revue et que la compétition entre le JMF et la nouvelle

40. Les Comptes Rendus des communications, la liste des participants et la composition du comité scientifique sont téléchargeable sur le site http://www.turbulence.ens.fr/to-be-noted/article/proceedings-of-the-turbulence-7.

revue doit être de nature constructive" [41]. Au-delà de cette polémique, les deux revues vont prospérer et élargir leurs volumes au cours des années.

Dans ces perspectives, il serait donc intéressant de voir la manière dont la mécanique des fluides française participe à cette deuxième vague d'internationalisation et de renouvellement des institutions. Les spécificités du cas français sont caractérisées d'une part par l'absence d'un complexe militaro-industriel fort analogue au complexe américain ou russe destiné à créer une mobilisation active des scientifiques (surtout des mathématiciens) et à promouvoir toujours plus les mathématiques appliquées pendant la guerre et durant les années immédiatement postérieures. D'autre part, ce cas est distingué par un paysage mathématique désormais profondément marqué par le bourbakisme [Dahan Dalmedico 1996]. Dans ces conditions, il serait intéressant de comprendre comment s'imposent, dans ce contexte, les canaux de communication (scientifiques et institutionnels) entre les milieux mathématiques et les milieux extra-mathématiques agissant dans la mécanique des fluides. Le mathématicien et spécialiste de mécanique des fluides Paul Germain (1920-2009), par exemple, jouera un rôle fondamental dans ce paysage, à travers la réorganisation de l'enseignement et de la recherche de la mécanique des fluides (et plus généralement de la mécanique des milieux continus) au sein de l'université de Paris et de l'Office national d'études et de recherches aérospatiales (ONERA) [42].

Dans ce contexte, la naissance de l'ONERA marquera profondément le monde de la mécanique des fluides de l'après-guerre. Cette institution à caractère industriel et commercial placée sous contrôle du ministre de l'Air, sera créée le 3 mai 1946 dans le but de reconstruire la recherche aéronautique française. A sa création participeront non seulement des personnalités affectées au ministère de l'Air et au G.R.A. (le chef du cabinet du Ministre de l'Air René Jugeau, le directeur du G.R.A. Poincaré, l'ingénieur général de l'Air Paul Dumanois etc.) mais aussi des universitaires comme Joseph Pérès, Frédéric Joliot-Curie, Maurice Roy, Louis de Broglie. Elle réunira une grande partie des souffleries et des centres de recherche et d'essais en aéronautique disséminés sur toute la France en un seul organisme public, y compris l'IMFL : Paris, Neuilly, Chalais-Meudon, Palaiseau, Brétigny, Lille, Modane, Grenoble, Cannes, Toulouse, Alger-Maison-Blanche, plus divers

41. Sur cette polémique voir [Eckert 2012].

42. Initialement intéressé par les équations aux dérivées partielles et la théorie des surfaces, c'est grâce à un stage au National Physical Laboratory britannique effectué sur le conseil de Pérès qu'il réoriente ses recherches dans le domaine de aéronautique. En tant que professeur à la Faculté des Sciences de Paris, il restructurera l'étude de la mécanique des fluides du point de vue pédagogique et de la recherche. En tant que directeur de l'ONERA à partir de 1962, il encouragera les études d'aérodynamique et de mécanique des fluides ; Sur Paul Germain et son rôle pendant les années 1950-1960 voir [Maugin 2017].

détachements scientifiques. C'est à partir de ce moment que l'IMFL deviendra ce qu'aujourd'hui on appelle encore le centre ONERA de Lille.

Outre l'ONERA et les universités, le CNRS, fondé par le décret-loi du 19 octobre 1939, est un autre organisme public qui coordonne l'activité de certains laboratoires de mécanique des fluides (principalement des instituts universitaires). Parmi les laboratoires rattachés au CNRS, nous pouvons mentionner les laboratoires de mécanique des fluides de Poitiers et de Strasbourg, le laboratoire des hautes température de Paris, et le laboratoire de calcul expérimental analogique au sein de l'Institut Blaise Pascal.

Comme pour le concept d'école et de communauté, le concept de discipline est difficile à définir dans le cas de la mécanique des fluides. C'est l'ensemble des problématiques que nous avons abordées lors de ce travail nous mènent aux réflexions suivantes. L'historien des sciences Bruno J. Strasser, dans son étude concernant l'émergence de la biologie moléculaire à Genève, identifie trois étapes dans l'émergence de cette discipline aux frontières de la biologie, de la physique et de la médecine : l'émergence de nouveaux discours, pratiques, instruments et expérimentations autour d'un petit groupe de collaborateurs tissant un réseau centré sur l'usage du microscope électronique (1945-1960) ; l'institutionnalisation de ce domaine à travers la création d'instituts de recherche et de journaux (1960-1970) ; la transformation de la nouvelle discipline tant au niveau scientifique qu'institutionnel (1970 à aujourd'hui). D'après cet historien il s'agit d'une histoire fondée sur la collaboration trandisciplinaire centrée sur l'usage d'un instrument. Le microscope en effet joue un rôle fondamental dans la constitution de la discipline : il est un "objet" de recherche, un "outil" appliqué à des problèmes très variés, un médiateur entre biologie et physique [Strasser 2002, 19]. Or, si nous pensons au concept de mécanique des fluides, ce dernier semble suivre ces trois étapes même si les processus sont plus lents. L'étude des mouvements des fluides acquiert en effet le statut de science au XVIII^{e} siècle suite à la publication d'*Hydrodynamique* par Daniel Bernouilli en 1738 [Guilbaud 2008]. Son institutionnalisation commencera à prendre forme au début du XX^{e} alors qu'elle subira des transformations scientifiques et institutionnelles profondes à partir de la fin de la seconde guerre mondiale suite à la création de l'ONERA et du CNRS. Cependant, il y a dans la mécanique des fluides un autre élément à prendre en compte, un élément qui donne des limites à l'application de l'approche de Strasser dans notre cas. Si la biologie moléculaire est aux frontières de la physique, de la biologie et la médecine, la mécanique des fluides est aux frontières de l'ingénierie, de la physique mais aussi des mathématiques. Il faut donc prendre en compte la spécificité des problématiques liées à la notion de discipline mathématique, spécificité qui

distingue cette notion par rapport à celle des autres disciplines scientifiques qui sont moins contemplatives [43]. Ces différences dépendent en effet de l'articulation entre les facteurs intellectuels (internes à la discipline) et les facteurs sociaux qui participent à l'établissement d'une discipline [Gauthier 2007, 22]. De plus, l'histoire de la mécanique des fluides n'est pas une histoire centrée sur un instrument mais c'est une histoire centrée sur l'usage de plusieurs instruments d'une part et des connaissances mathématiques d'autre part, selon les applications du domaine et la période envisagée. Dans le cas du XX e nous avons vu, par exemple, la manière dont d'un côté les souffleries et de l'autre côté les connaissances mathématiques dérivant du calcul des probabilités et des statistiques, ont joué un rôle fondamental dans l'évolution de cette discipline. En reprenant les mots de Strasser, souffleries et mathématiques constituaient à cette époque des "objets" de recherche, des "outils" appliqués à des problèmes très variés, et des médiateurs entre théorie et pratique".

Enfin, en ce qui concerne la trajectoire de Kampé de Fériet, après la guerre, elle échappe aux changements institutionnels profonds qui affectent la mécanique des fluides française de cette époque. Professeur de mécanique des fluides à la Faculté des Sciences de Lille mais non plus directeur de l'IMFL, ses recherches se focalisent sur des questions toujours plus abstraites car il cultive davantage son identité de mathématicien, au détriment de ses identités d'expérimentateur et de directeur d'institut. Ses voyages aux États-Unis sont encore plus fréquents grâce aussi aux collaborations scientifiques très étroites qu'il instaure avec Garret Birkhoff après la guerre et il continue de participer très activement à la vie de la communauté internationale de la mécanique des fluides alors qu'il s'éloigne de plus en plus de Villat. La collaboration avec Birkhoff donnera lieu à des publications comme *Champs de vitesse aléatoires* (1957), *Kinematics of homogeneous turbulence* (1958), *Statistically well-set Cauchy problems* (1973).
Les idées théoriques ne semblent pas avoir la même influence que celles des spécialistes d'ordre international de sa génération comme von Kármán, Taylor, Prandtl. Si on pense aux recherches sur la théorie de la turbulence présentées par les mécaniciens des fluides de la nouvelle génération au colloque international de Marseille de 1961, les travaux théoriques de Kampé de Fériet sur ce sujet ne semblent pas avoir eu un fort impact sur ces recherches même si la réputation internationale de ce mathématicien à ce colloque était indiscutable. Cependant, cela ne veut pas dire que ces travaux ont été oubliés par cette nouvelle génération et surtout que personne n'a développé ces travaux. En effet, sa contribution jusqu'aux années 1950 est mentionnée dans des monographies sur la mécanique

43. Pour une analyse des problématiques liés à la notion de discipline dans le cas des mathématiques voir [Gauthier 2007, 22].

statistique et sur les modèles théoriques de processus turbulents qui sont connues et utilisées encore aujourd'hui aussi pour des fins pédagogiques. A titre d'exemple nous pouvons mentionner le livre d'Alexandre Favre *La turbulence en mécanique des fluides : bases théoriques et expérimentales, méthodes statistiques* (1976) ainsi que celui d'Andrei Monin et Yaglom et Isaak Yaglom *Statistical Fluid Mechanics, Volume II : Mechanics of Turbulence* (1975). De plus, s'il est vrai que la plupart des étudiants de Kampé de Fériet étaient des ingénieurs issus de l'Institut Industriel du Nord qui n'ont pas poursuivi ses recherches théoriques en s'attachant plutôt aux recherches de type expérimental, il ne faut pas oublier qu'il y a deux exceptions : Ratib Berker et Naftali Frenkiel. Le premier poursuivra ses recherches concernant l'étude des solutions exactes d'un fluide et le second ses recherches sur la théorie de la turbulence. En particulier, avec Frenkiel, Kampé de Fériet poursuivra ses échanges scientifiques même après la guerre ce qui donnera lieu à des publications, notamment *Correlation for truncated samples of a random function"* (1954), *Estimation de la corrélation d'une fonction aléatoire non stationnaire* (1959), *Correlations and Spectra for Non-Stationary Random Functions* (1962).

Après la seconde guerre mondiale, ce prisme ne reflétera donc que des aspects toujours plus théoriques de la théorie de la turbulence qui déboucheront vers le calcul des probabilités, l'analyse harmonique, la mécanique statistique des milieux continus et, après sa retraite en 1964, vers la théorie de l'information. Dans son parcours et sa multiplicité d'identités, nous pouvons remarquer que la phase initiale correspond à son activité de recherche en analyse et sa dernière phase à son activité en théorie de l'information : il va ainsi des mathématiques pures aux mathématiques pures. En théorie de l'information, il donnera pendant les années 1960 une série de conférences et de cours dans le cadre des enseignements du centre de Calcul de la Faculté des Sciences de Lille. Ces travaux effectués en collaboration avec les mathématiciens Bruno Forte (Pavie) et Pietro Benvenuti (Rome), visant à généraliser la théorie de Wiener-Shannon, seront très appréciés par des bourbakistes comme Jean Dieudonné. A ce propos, nous conclurons avec la citation de Dieudonné contenue dans la préface au colloque sur la théorie de l'information ("L'information et les questionnaires") organisé par Kampé de Fériet et son collaborateur François Picard au Centre de Rencontres Mathématiques de Luminy (5-7 juin 1973), dont Dieudonné était le président. Il écrit :

> "Il convient d'attirer particulièrement l'attention sur les contributions à ce volume suscités par la nouvelle direction imprimée à la théorie de l'information par MM. J. KAMPE DE FERIET et BRUNO FORTE depuis 1967. En cherchant à dégager cette théorie de ses liens trop étroits avec le Calcul des Probabilités, ils ont été amenés à l'axiomatiser d'une façon originale ; et il semble bien que se manifestent déjà

les conséquences heureuses qui découlent d'une axiomatisation bien faite : élargissement de vues conduisant à un approfondissement des théories existantes, et nouvelles voies ouvertes tant en ce qui concerne les spéculations théoriques que le champ des applications diverses. On peut donc attendre avec confiance des progrès sensibles dans les questions discutées au cours de ce Colloque, qui, dans un proche avenir, auront, nous l'espérons, l'objet de réunions aussi fructueuses." [Dold et Eckmann 1974, 3]

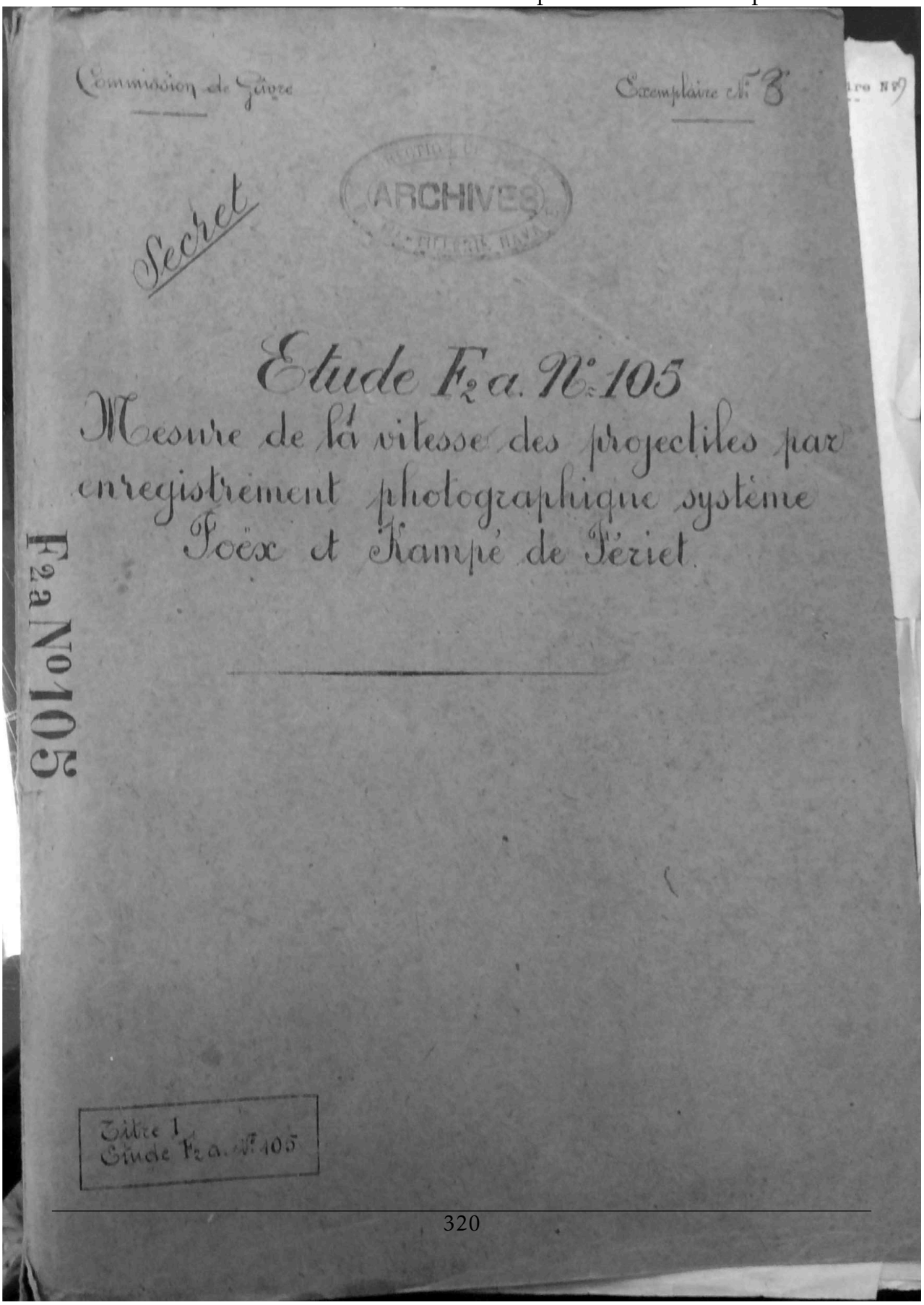
Annexe A

Les travaux expérimentaux de Kampé de Fériet

Dans cette annexe nous avons sélectionné deux extraits du texte de Kampé de Fériet montrant son approche expérimentale à la balistique et à la mécanique des fluides.

Le premier extrait est tiré de son étude F2a n. 205 (*Mesure de la vitesse des projectiles par enregistrement photographique*) effectué à la Commission de Gâvre entre 1918 et 1919 en collaboration avec Gabriel Foex. Cette étude, qui n'est pas classée, est conservé aux Archives de la Commission de Gâvre, Service historique de la Défense -Marine, Lorient.

Le deuxième extrait concerne l'enregistrement cinématographique des mouvements des nuages et il provient d'un rapport de décembre 1937 rédigé pour l'ISTUS (Internationale Studienkommission für den motorlosen Flug), conservé dans le fonds Kampé de Fériet des Archives de l'ONERA Lille.


Commission de Gâvre
Exemplaire N° 3
Secret
ARCHIVES
Etude F2 a. N° 105
Mesure de la vitesse des projectiles par enregistrement photographique système Foëx et Kampé de Fériet
F2a N°105
Titre I
Etude F2 a. N° 105

ANNEXE A.

Archives de la Commission de Gâvre.

ENREGISTRÉ
A LA SALLE A TRACER
25 JUIN 1918
Archives 104

Note :

Sur la mesure de la vitesse des projectiles par enregistrement photographique

par Messieurs :

G. Foëx.
Agrégé de Physique.

J. Kampé de Férier.
Docteur-ès-Sciences.

DIRECTION CENTRALE
ARCHIVES
DE L'ARTILLERIE NAVALE

13 DEC 1918

Pièce Communiquée à B C T
le 25 JUIN 1918
A RETOURNER

391

Lorient, le 13 juin 1918.

Sur la mesure de la vitesse des projectiles par enregistrement photographique.

I.– Objet de la présente Note.

La présente Note a pour objet d'exposer succinctement le principe d'un nouveau procédé de mesure des vitesses des projectiles et de rendre compte des premiers résultats expérimentaux obtenus par nous dans cette voie.–

Nous avons lieu d'espérer que notre méthode de mesure satisfera aux conditions suivantes, qui semblent s'imposer dans cet ordre de recherches :

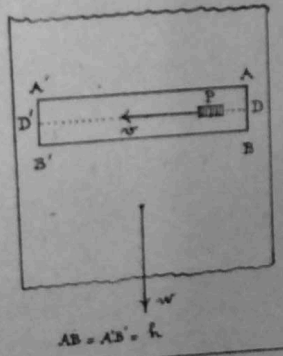
1°. permettre la mesure des vitesses sous tous les angles de tir,

2°. donner la vitesse avec une précision de l'ordre du millième (erreur absolue ne dépassant pas 1 mètre sur une vitesse voisine de 1000 mètres; ce degré de précision paraît être celui des méthodes actuellement en usage sur les polygones),

3°. être d'une application assez aisée pour qu'on puisse prévoir son emploi par les combattants.

II.– Principe optique de la méthode.

Soit ABA'B' une fente rectangulaire, derrière laquelle se meut avec une vitesse de translation w (normale au bord AA') une couche sensible,(1) sur laquelle se forme l'image P d'un projectile, donnée par un objectif placé en avant de la fente. Nous supposons la fente orientée de telle façon que ses bords AA' et BB' soient parallèles au segment sensiblement rectiligne DD', décrit par l'image P (2) tandis que



(1) – plaque tombante ou film.
(2) – v désigne la vitesse de translation de l'image P.

ANNEXE A.

le projectile se déplace sur sa trajectoire (l'axe optique de l'objectif étant normal à l'élément de trajectoire).

Si nous imaginons que le fond devant lequel se déplace le projectile (en pratique, le ciel) soit uniformément éclairé, les points de la couche sensible se rangent en deux groupes selon que pendant leur passage devant la fente ils rencontrent ou ne rencontrent pas l'image P du projectile.

Les points qui ne la rencontrent pas sont tous exposés au même éclairement pendant la même durée égale à

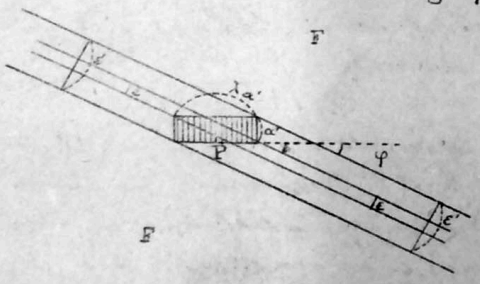
$$\frac{h}{W}$$

Cette partie de la couche sensible (désignée sous le nom de fond F) apparaîtra donc au développement avec une teinte noire uniforme.

Quant aux autres points la durée de leur exposition au fond éclairé est égale au temps $\frac{h}{W}$ diminué du temps pendant lequel ils sont couverts par l'image P.

On voit bien facilement que les points de cette dernière catégorie sont compris dans une bande qui fait avec les bords AA' et BB' de la fente un angle φ tel que :

$$\operatorname{tang} \varphi = \frac{w}{v}$$



En particulier, si le projectile est un boulet cylindrique ayant pour image P un petit rectangle de cotés a' et λa' (1) la trace de P sur la couche sensible apparaîtra sous la forme d'une bande de teinte uniforme et d'épaisseur

$$\varepsilon = a' (\lambda \sin \varphi - \cos \varphi)$$

entourée d'une bande de pénombre d'épaisseur

$$\varepsilon' = a' (\lambda \sin \varphi + \cos \varphi)$$

Le contraste entre la teinte du fond F et celle de la bande ε dépend directement du rapport de la hauteur a' de l'image P à la hauteur h de la fente. En effet (2) un point de la bande ε est exposé au fond éclairé pendant un temps :

$$\frac{h - a'}{W}$$

(1). λ désigne la longueur du projectile en calibres ; $a' = a \frac{f}{p}$ a : diamètre du projectile, f : distance focale de l'objectif, p : distance du centre optique à l'élément de trajectoire.

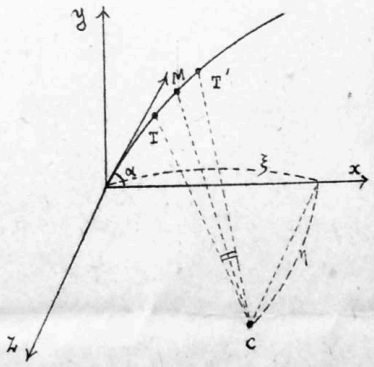
(2) Ce raisonnement suppose que la quantité de lumière réfléchie par le projectile est négligeable.

Le rapport des durées d'exposition d'un point de $\mathcal{E}$ et d'un point de F est donc

$$\frac{h - a'}{h} = 1 - \frac{a'}{h}$$

III.– Principe de la méthode de mesure.–

Nous pensons utiliser de la manière suivante, pour la mesure de la vitesse V du projectile, l'enregistrement photographique de la trace $\mathcal{E}$ laissée par son image P sur la couche sensible :



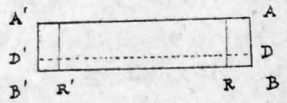
On pointera l'axe optique de l'objectif sur un point M de la trajectoire, le bord AA' de la fente étant rendu à peu près parallèle à la tangente en M à la trajectoire. (1)

Deux fils de réticule R et R', placés sur la fente (de distance angulaire mesurée une fois pour toutes), définissent sur la trajectoire deux points T et T' dont on déduit la distance

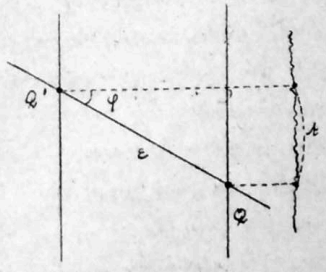
$$d = \overline{TT'}$$

de la connaissance de l'angle $T\widehat{C}T'$ et de la distance

$$CM = p$$



Sur la bande sensible les fils de réticule R et R' laisseront comme traces deux droites parallèles qui couperont la trace $\mathcal{E}$ en deux points Q et Q', correspondant respectivement au passage du projectile en T et T'.



Si l'on inscrit d'autre part le temps sur la bande (par exemple au moyen d'un diapason occultant une source lumineuse) on aura, par simple lecture, le temps t écoulé entre les passages du projectile en T et en T'.

(1).– Ces deux opérations sont réalisables, connaissant les coordonnées ξ, η de l'appareil C par rapport à la bouche O et l'angle de tir α ; en effet il s'agit de mesurer les vitesses dans le voisinage de la bouche ; il suffira donc de pointer l'axe optique sur un point de la tangente à l'origine (situés à une distance donnée de l'origine) et de donner au bord AA' de la fente l'angle φ ; pour obtenir ce résultat il faut que l'appareil soit monté à la façon d'un théodolite, l'axe optique de l'objectif pouvant coïncider avec une droite quelconque issue de C, facile à déterminer à l'avance dans chaque cas d'espèce.

La vitesse moyenne V du projectile sur l'élément de trajectoire TM T' :

$$V = \frac{d}{t}$$

résulte de la connaissance de d et t. (1)

IV.– Conditions de réalisation.–

Nous nous proposons de déterminer la vitesse V avec la précision du millième ; chacun des éléments d et t doit donc être connu au moins avec la même précision. –

Si l'on trouve opportun de conserver à peu près les conditions actuelles d'emploi des cadres-cibles, fonctionnant avec les chronographes Sebaulengé-Bréger, on doit prendre $t = 0^s,1$

La connaissance de t résultant d'une lecture faite sur la bande, si l'on fixe comme précision pour cette lecture $0^m,m\,1$, celà entraîne pour la vitesse de déroulement w la condition d'être au moins égale à 1 mètre par seconde.

Quant à la longueur d elle résulte du choix de t :

$$d = \frac{V}{10}$$

avec les projectiles actuels on a toujours $d < 100^m$.

Bien entendu, ces nombres ne sont donnés que pour fixer les idées ; la méthode permet d'utiliser des longueurs d beaucoup plus courtes, puisqu'en augmentant la vitesse w, on peut déterminer le temps t avec une plus grande précision.

Au point de vue optique le contraste entre E et F augmente avec le rapport $\frac{a}{h}$; on a donc intérêt à prendre une fente étroite (h petit) et (à distance p égale) un objectif à long foyer ($a' = a\frac{f}{p}$ grand) ; on est limité dans la diminution de h, par la difficulté d'obtenir l'image P dans la fente, si h devient trop petit ; dans l'augmentation de a' on est de même limité par la nécessité d'obtenir des traits fins (E petit).

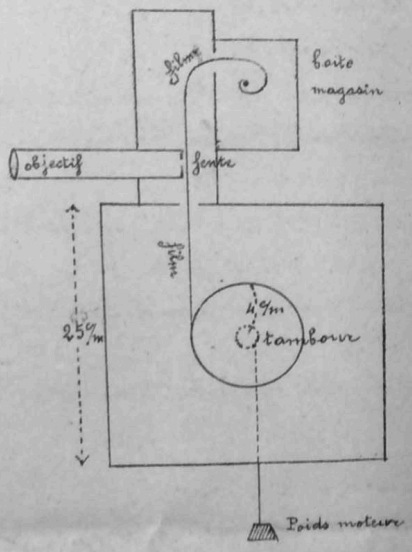
V.– Résultats expérimentaux.–

Nous nous sommes proposés de vérifier l'exactitude du principe admis au § II et de rechercher notamment si, pour une

(1).– On dispose d'un grand arbitraire dans le choix des coordonnées ξ η de l'appareil : sous les grands angles de tir notamment il pourra être avantageux de le placer dans le plan de tir ($\eta = 0$).

bande sensible se déroulant à une vitesse d'environ 1 mètre par seconde, un projectile animé d'une vitesse V de l'ordre de 800 mètres à la seconde, laissait bien une trace e suffisamment nette et accentuée pour permettre des mesures.

Pour nos expériences nous nous sommes servis d'un cinéma d'un vieux modèle, dénommé "Cinépar", appartenant à la Commission de Gâvre. Nous avons supprimé le système d'entraînement à griffes. Nous entraînons le film au moyen d'un tambour de 4 ^{cm} de rayon sur lequel il s'enroule. Nous communiquons un mouvement de rotation à l'axe de ce tambour en suspendant à une cordelette enroulée sur cet axe des poids connus et variables.



La vitesse de rotation du tambour nous est donnée au moyen d'un contact électrique (produisant deux ruptures par tour du tambour) placé dans le circuit d'une des plumes du chronographe Bouliette; la deuxième plume est mise dans le circuit de deux interrupteurs électro-acoustiques placés au voisinage de la pièce.

Nous avons utilisé l'un des objectifs de l'appareil "Cinépar", de longueur focale $f = 18$ ^{cm}, objectif "Steinheil de Munich N° 43303" travaillant à environ $f/6$. Les dimensions de la fente interposée en avant de la couche sensible étaient:

$AA' = 30$ $^{m}/_{m}$ $\quad AB = h = 5$ $^{m}/_{m}$

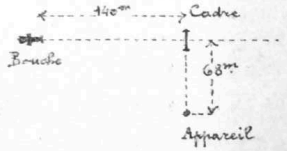
Nous avons employé comme bande sensible un rouleau de film de la maison Pathé (pellicule orthochromatique) mise à notre disposition par la Direction des Inventions.—

Nous avons exécuté quatre séries d'expériences: une avec un canon de 155 $^{m}/_{m}$, les trois autres avec des canons de 19 ^{cm}; voici le compte rendu de l'avant dernière série, pour laquelle seule nous avons pu mesurer notre vitesse de déroulement.

Séance du 7 juin 1918

Canon de 19 c/m M.le 93-96 tirant des boulets cylindriques.

Expériences exécutées pendant le tir aux vitesses initiales, l'appareil étant placé à hauteur du 2e cadre-cible à 140 m. en avant de la bouche, à 68 m. à droite du plan de tir.



La mise au point est effectuée sur le cadre-cible, dont on amène les extrémités inférieures et supérieures à tangenter les bords de la fente.

Circonstances atmosphériques :- beau temps, très sec ; ciel légèrement voilé par des nuages à haute altitude ; la lumière diminue d'intensité pendant la séance : soleil assez clair aux coups 2, 3 et 4, presque caché au coup 5 et complètement au coup 6 ; pendant la séance (de 11h50 à 12h30) les rayons solaires viennent de la droite de l'appareil, dans une direction sensiblement parallèle au plan de tir.

N° du coup.	Poids moteur	Vitesse de déroulement W au passage du projectile dans le 2e cadre (1) m.p.s.	Vitesse du projectile à son passage dans le 2e cadre m.p.s.	Vitesse V de l'image du projectile. m.p.s.	Projectiles : B.C. a = 19 c/m λ = 2,1 f = 18 c/m p = 68 m. a' = 0 m/m 5 a'/b = 1/10
1	"	"	"	"	flambé, l'appareil n'est pas mis en marche
2	3k500	1,45	750	1,98	photo reproduite ci-contre (N°2)
3	3k500	1,45	745	1,97	même résultat qu'au coup précédent
4	2k000	"	745	1,97	le tambour démarre mal ; W est très faible, on obtient cependant une bonne image
5	2k500	0,76	680	1,80	bonne image.
6	2k500	0,71	680	1,80	photo reproduite ci-contre. (N°1)

(1) La vitesse W est obtenue par la lecture des bandes du chronographe Boulitte ; de la rupture des interrupteurs électro-acoustiques, on déduit sur cette bande l'instant du passage du projectile dans le 2e cadre par un calcul très simple.

Sur les photographies jointes à cette Note,(1) le trait vertical fort est la trace du cadre ciblé sur lequel l'appareil est mis au point; le trait vertical plus faible est la trace d'un autre cadre situé plus loin; la trace é du projectile coupe ces traits verticaux en faisant avec l'horizontale les angles.

$\varphi = 25° 30'$ (Photo 1)
$\varphi = 35° 0'$ (Photo 2)
$\varphi = 52° 30'$ (Photo 3)

VI.- Conclusions

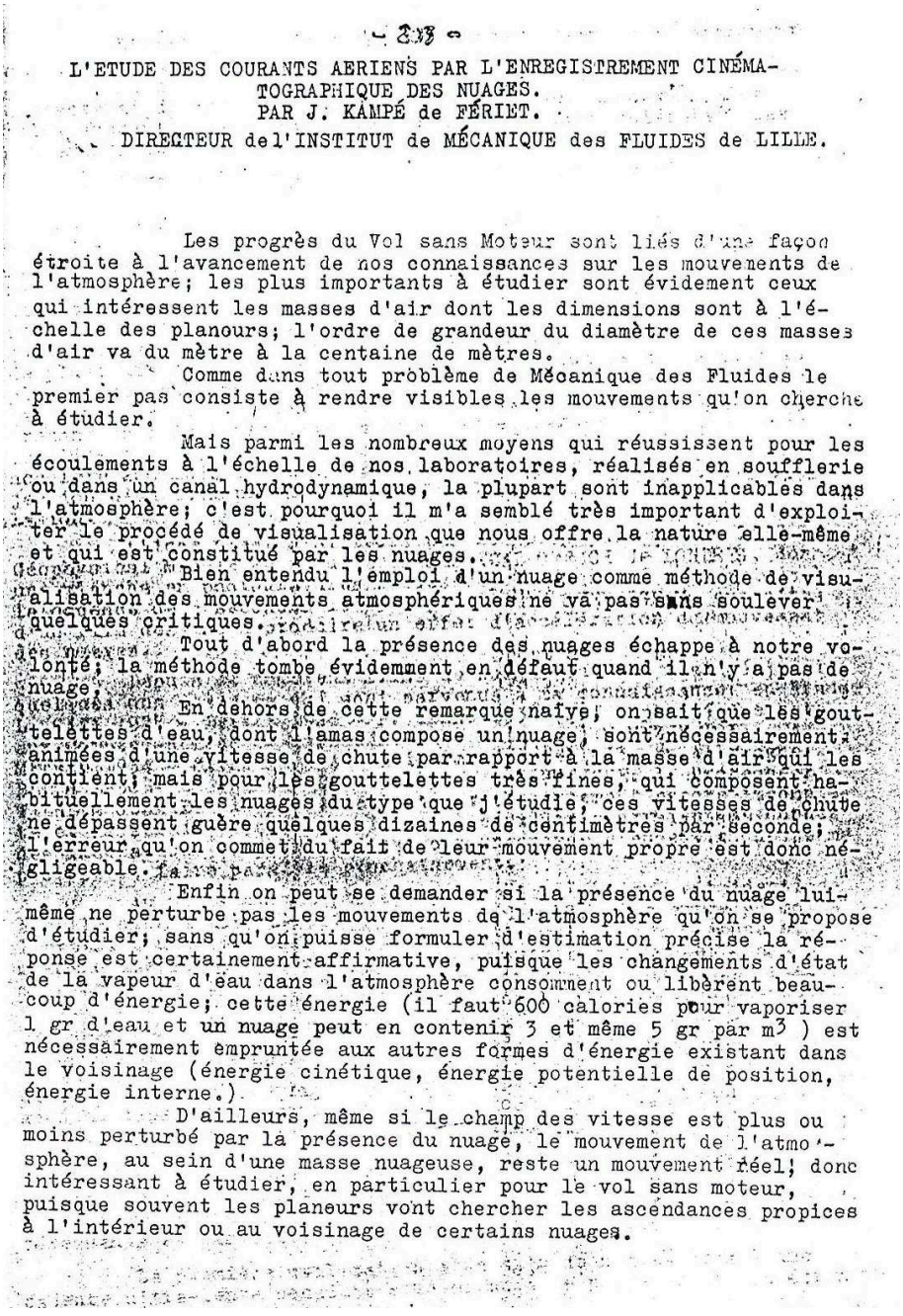
Ayant ainsi vérifié, avec cette installation rudimentaire, notre point de départ, nous nous proposons de continuer nos recherches dans cette voie. Dès que nous aurons réuni un ensemble suffisant de résultats nous donnerons le plan d'un appareil définitif pour l'emploi de notre procédé.

Lorient, le 13 juin 1918.

J. Kampé de Fériet

F. Foëx

(1).- La Photographie N.3 a été prise dans la séance du 14 Juin. Même canon, mêmes conditions, sauf la distance p notablement augmentée $p = 117^m$.



- 203 -

L'ETUDE DES COURANTS AERIENS PAR L'ENREGISTREMENT CINÉMATOGRAPHIQUE DES NUAGES.

PAR J. KAMPÉ de FÉRIET.
DIRECTEUR de l'INSTITUT de MÉCANIQUE des FLUIDES de LILLE.

Les progrès du Vol sans Moteur sont liés d'une façon étroite à l'avancement de nos connaissances sur les mouvements de l'atmosphère; les plus importants à étudier sont évidement ceux qui intéressent les masses d'air dont les dimensions sont à l'échelle des planours; l'ordre de grandeur du diamètre de ces masses d'air va du mètre à la centaine de mètres.

Comme dans tout problème de Mécanique des Fluides le premier pas consiste à rendre visibles les mouvements qu'on cherche à étudier.

Mais parmi les nombreux moyens qui réussissent pour les écoulements à l'échelle de nos laboratoires, réalisés en soufflerie ou dans un canal hydrodynamique, la plupart sont inapplicables dans l'atmosphère; c'est pourquoi il m'a semblé très important d'exploiter le procédé de visualisation que nous offre la nature elle-même et qui est constitué par les nuages.

Bien entendu l'emploi d'un nuage comme méthode de visualisation des mouvements atmosphériques ne va pas sans soulever quelques critiques.

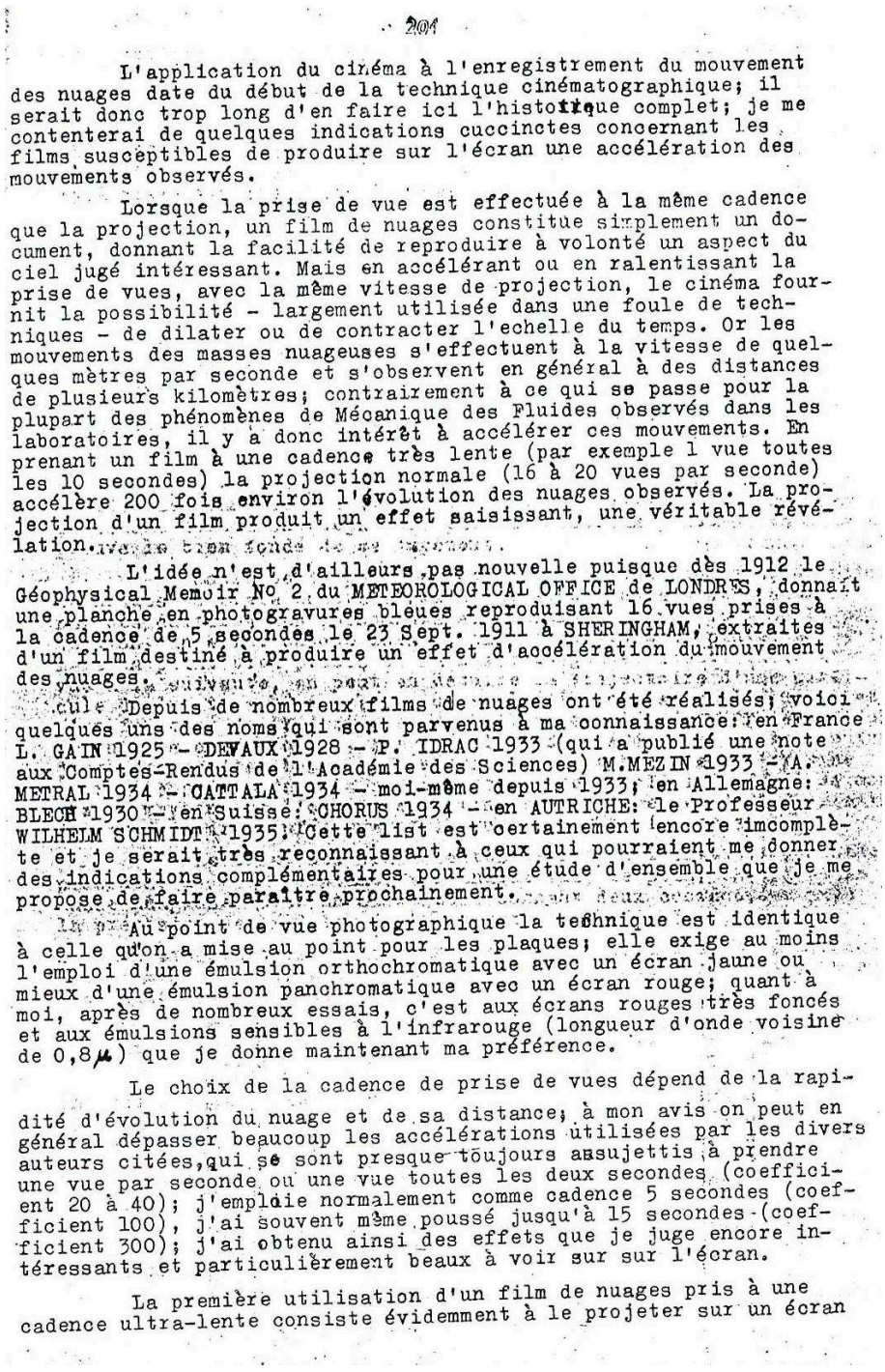
Tout d'abord la présence des nuages échappe à notre volonté; la méthode tombe évidemment en défaut quand il n'y a pas de nuage;

En dehors de cette remarque naïve, on sait que les gouttelettes d'eau, dont l'amas compose un nuage, sont nécessairement animées d'une vitesse de chute par rapport à la masse d'air qui les contient; mais pour les gouttelettes très fines, qui composent habituellement les nuages du type que j'étudie, ces vitesses de chute ne dépassent guère quelques dizaines de centimètres par seconde; l'erreur qu'on commet du fait de leur mouvement propre est donc négligeable.

Enfin on peut se demander si la présence du nuage lui-même ne perturbe pas les mouvements de l'atmosphère qu'on se propose d'étudier; sans qu'on puisse formuler d'estimation précise la réponse est certainement affirmative, puisque les changements d'état de la vapeur d'eau dans l'atmosphère consomment ou libèrent beaucoup d'énergie; cette énergie (il faut 600 calories pour vaporiser 1 gr d'eau et un nuage peut en contenir 3 et même 5 gr par m^3) est nécessairement empruntée aux autres formes d'énergie existant dans le voisinage (énergie cinétique, énergie potentielle de position, énergie interne.)

D'ailleurs, même si le champ des vitesse est plus ou moins perturbé par la présence du nuage, le mouvement de l'atmosphère, au sein d'une masse nuageuse, reste un mouvement réel; donc intéressant à étudier, en particulier pour le vol sans moteur, puisque souvent les planeurs vont chercher les ascendances propices à l'intérieur ou au voisinage de certains nuages.

FIGURE A.1 – Les travaux expérimentaux de Kampé de Fériet, p. 1



- 204 -

L'application du cinéma à l'enregistrement du mouvement des nuages date du début de la technique cinématographique; il serait donc trop long d'en faire ici l'historique complet; je me contenterai de quelques indications succinctes concernant les films susceptibles de produire sur l'écran une accélération des mouvements observés.

Lorsque la prise de vue est effectuée à la même cadence que la projection, un film de nuages constitue simplement un document, donnant la facilité de reproduire à volonté un aspect du ciel jugé intéressant. Mais en accélérant ou en ralentissant la prise de vues, avec la même vitesse de projection, le cinéma fournit la possibilité - largement utilisée dans une foule de techniques - de dilater ou de contracter l'echelle du temps. Or les mouvements des masses nuageuses s'effectuent à la vitesse de quelques mètres par seconde et s'observent en général à des distances de plusieurs kilomètres; contrairement à ce qui se passe pour la plupart des phénomènes de Mécanique des Fluides observés dans les laboratoires, il y a donc intérêt à accélérer ces mouvements. En prenant un film à une cadence très lente (par exemple 1 vue toutes les 10 secondes) la projection normale (16 à 20 vues par seconde) accélère 200 fois environ l'évolution des nuages observés. La projection d'un film produit un effet saisissant, une véritable révélation.

L'idée n'est d'ailleurs pas nouvelle puisque dès 1912 le Géophysical Memoir No 2 du METEOROLOGICAL OFFICE de LONDRES, donnait une planche en photogravures bleues reproduisant 16 vues prises à la cadence de 5 secondes le 23 Sept. 1911 à SHERINGHAM, extraites d'un film destiné à produire un effet d'accélération du mouvement des nuages.

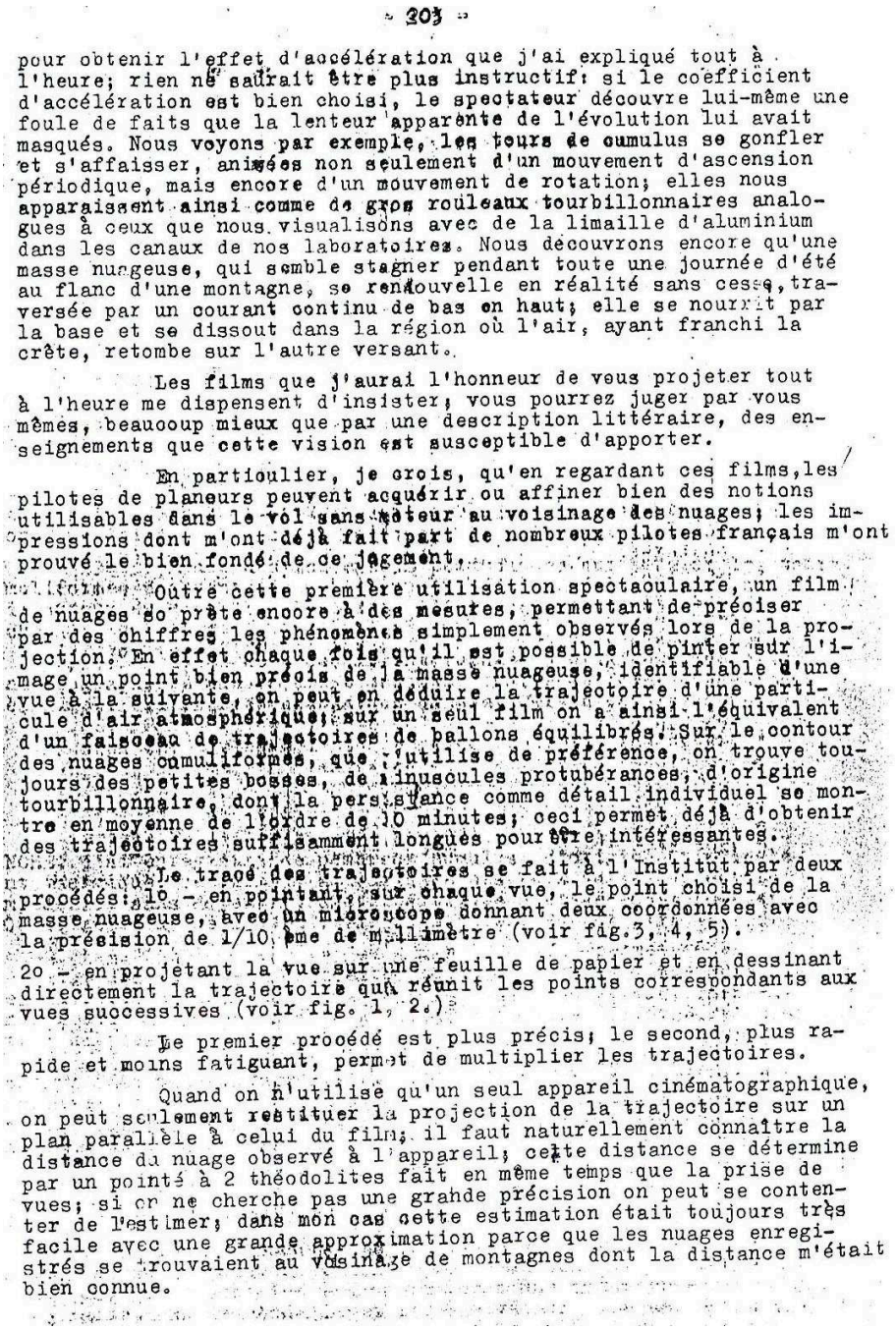
Depuis de nombreux films de nuages ont été réalisés; voici quelques uns des noms qui sont parvenus à ma connaissance: en France L. GAIN 1925 - DEVAUX 1928 - P. IDRAC 1933 (qui a publié une note aux Comptes-Rendus de l'Académie des Sciences) M.MEZIN 1933 - YA. METRAL 1934 - CATTALA 1934 - moi-même depuis 1933; en Allemagne: BLECH 1930 - en Suisse: CHORUS 1934 - en AUTRICHE: le Professeur WILHELM SCHMIDT 1935. Cette list est certainement encore imcomplète et je serait très reconnaissant à ceux qui pourraient me donner des indications complémentaires pour une étude d'ensemble que je me propose de faire paraître prochainement.

Au point de vue photographique la technique est identique à celle qu'on a mise au point pour les plaques; elle exige au moins l'emploi d'une émulsion orthochromatique avec un écran jaune ou mieux d'une émulsion panchromatique avec un écran rouge; quant à moi, après de nombreux essais, c'est aux écrans rouges très foncés et aux émulsions sensibles à l'infrarouge (longueur d'onde voisine de 0,8μ) que je donne maintenant ma préférence.

Le choix de la cadence de prise de vues dépend de la rapidité d'évolution du nuage et de sa distance; à mon avis on peut en général dépasser beaucoup les accélérations utilisées par les divers auteurs citées, qui se sont presque toujours assujettis à prendre une vue par seconde ou une vue toutes les deux secondes (coefficient 20 à 40); j'emploie normalement comme cadence 5 secondes (coefficient 100), j'ai souvent même poussé jusqu'à 15 secondes (coefficient 300); j'ai obtenu ainsi des effets que je juge encore intéressants et particulièrement beaux à voir sur sur l'écran.

La première utilisation d'un film de nuages pris à une cadence ultra-lente consiste évidemment à le projeter sur un écran

FIGURE A.2 – Les travaux expérimentaux de Kampé de Fériet, p. 2



- 203 -

pour obtenir l'effet d'accélération que j'ai expliqué tout à l'heure; rien ne saurait être plus instructif: si le coefficient d'accélération est bien choisi, le spectateur découvre lui-même une foule de faits que la lenteur apparente de l'évolution lui avait masqués. Nous voyons par exemple, les tours de cumulus se gonfler et s'affaisser, animées non seulement d'un mouvement d'ascension périodique, mais encore d'un mouvement de rotation; elles nous apparaissent ainsi comme de gros rouleaux tourbillonnaires analogues à ceux que nous visualisons avec de la limaille d'aluminium dans les canaux de nos laboratoires. Nous découvrons encore qu'une masse nuageuse, qui semble stagner pendant toute une journée d'été au flanc d'une montagne, se renouvelle en réalité sans cesse, traversée par un courant continu de bas en haut; elle se nourrit par la base et se dissout dans la région où l'air, ayant franchi la crête, retombe sur l'autre versant.

Les films que j'aurai l'honneur de vous projeter tout à l'heure me dispensent d'insister; vous pourrez juger par vous mêmes, beaucoup mieux que par une description littéraire, des enseignements que cette vision est susceptible d'apporter.

En particulier, je crois, qu'en regardant ces films, les pilotes de planeurs peuvent acquérir ou affiner bien des notions utilisables dans le vol sans moteur au voisinage des nuages; les impressions dont m'ont déjà fait part de nombreux pilotes français m'ont prouvé le bien fondé de ce jugement.

Outre cette première utilisation spectaculaire, un film de nuages se prête encore à des mesures, permettant de préciser par des chiffres les phénomènes simplement observés lors de la projection. En effet chaque fois qu'il est possible de pointer sur l'image un point bien précis de la masse nuageuse, identifiable d'une vue à la suivante, on peut en déduire la trajectoire d'une particule d'air atmosphérique; sur un seul film on a ainsi l'équivalent d'un faisceau de trajectoires de ballons équilibrés. Sur le contour des nuages cumuliformes, que l'utilise de préférence, on trouve toujours des petites bosses, de minuscules protubérances, d'origine tourbillonnaire, dont la persistance comme détail individuel se montre en moyenne de l'ordre de 10 minutes; ceci permet déjà d'obtenir des trajectoires suffisamment longues pour être intéressantes.

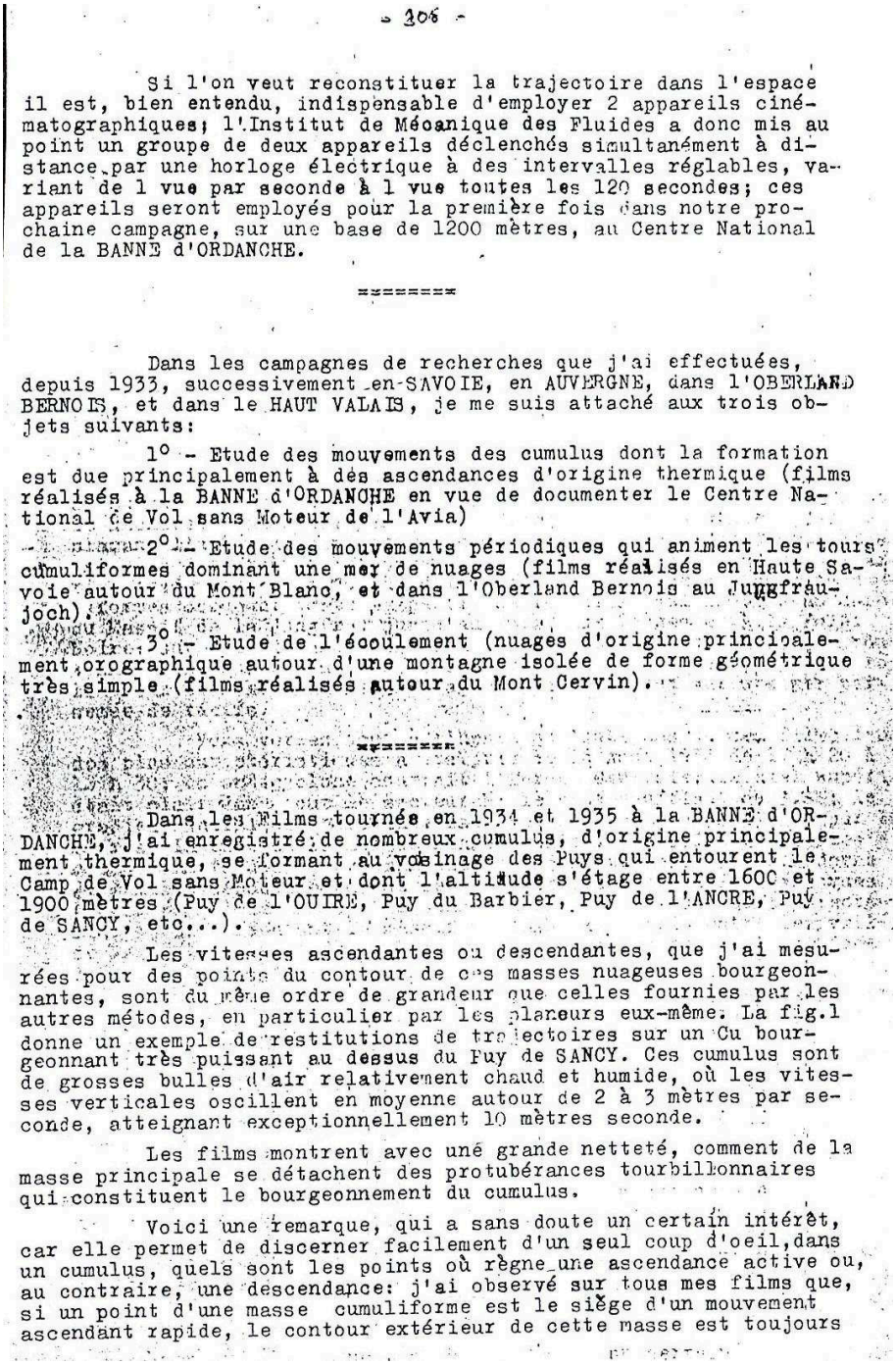
Le tracé des trajectoires se fait à l'Institut par deux procédés: 1o - en pointant, sur chaque vue, le point choisi de la masse nuageuse, avec un microscope donnant deux coordonnées avec la précision de 1/10 ème de millimètre (voir fig. 3, 4, 5).

2o - en projetant la vue sur une feuille de papier et en dessinant directement la trajectoire qui réunit les points correspondants aux vues successives (voir fig. 1, 2.)

Le premier procédé est plus précis; le second, plus rapide et moins fatiguant, permet de multiplier les trajectoires.

Quand on n'utilise qu'un seul appareil cinématographique, on peut seulement restituer la projection de la trajectoire sur un plan parallèle à celui du film; il faut naturellement connaître la distance du nuage observé à l'appareil; cette distance se détermine par un pointé à 2 théodolites fait en même temps que la prise de vues; si on ne cherche pas une grande précision on peut se contenter de l'estimer; dans mon cas cette estimation était toujours très facile avec une grande approximation parce que les nuages enregistrés se trouvaient au voisinage de montagnes dont la distance m'était bien connue.

FIGURE A.3 – Les travaux expérimentaux de Kampé de Fériet, p. 3



- 306 -

Si l'on veut reconstituer la trajectoire dans l'espace il est, bien entendu, indispensable d'employer 2 appareils cinématographiques; l'Institut de Mécanique des Fluides a donc mis au point un groupe de deux appareils déclenchés simultanément à distance par une horloge électrique à des intervalles réglables, variant de 1 vue par seconde à 1 vue toutes les 120 secondes; ces appareils seront employés pour la première fois dans notre prochaine campagne, sur une base de 1200 mètres, au Centre National de la BANNE d'ORDANCHE.

========

Dans les campagnes de recherches que j'ai effectuées, depuis 1933, successivement en SAVOIE, en AUVERGNE, dans l'OBERLAND BERNOIS, et dans le HAUT VALAIS, je me suis attaché aux trois objets suivants:

1° - Etude des mouvements des cumulus dont la formation est due principalement à des ascendances d'origine thermique (films réalisés à la BANNE d'ORDANCHE en vue de documenter le Centre National de Vol sans Moteur de l'Avia)

2° - Etude des mouvements périodiques qui animent les tours cumuliformes dominant une mer de nuages (films réalisés en Haute Savoie autour du Mont Blanc, et dans l'Oberland Bernois au Jungfraujoch).

3° - Etude de l'écoulement (nuages d'origine principalement orographique autour d'une montagne isolée de forme géométrique très simple (films réalisés autour du Mont Cervin).

========

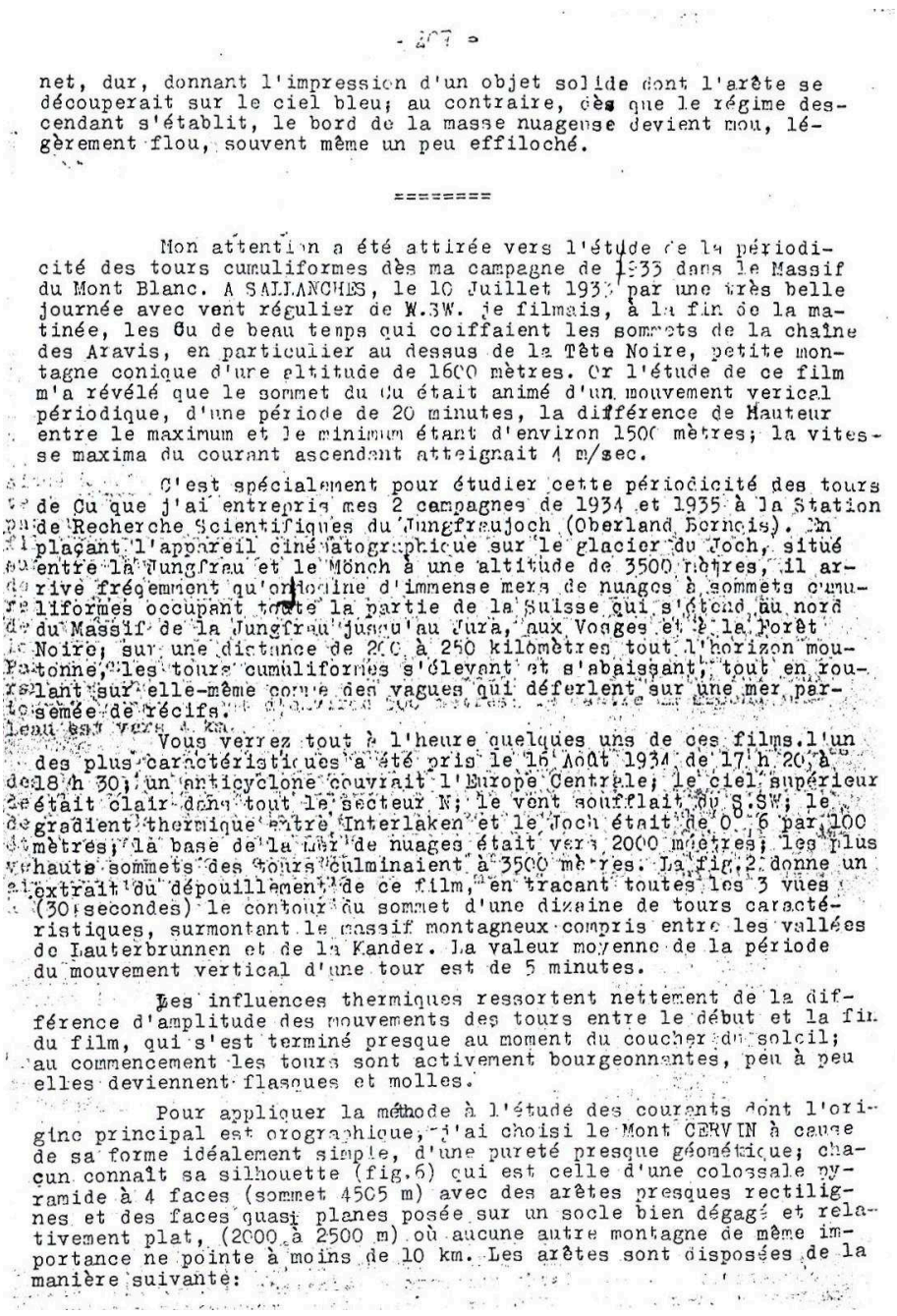
Dans les films tournés en 1934 et 1935 à la BANNE d'ORDANCHE, j'ai enregistré de nombreux cumulus, d'origine principalement thermique, se formant au voisinage des Puys qui entourent le Camp de Vol sans Moteur et dont l'altitude s'étage entre 1600 et 1900 mètres (Puy de l'OUIRE, Puy du Barbier, Puy de l'ANCRE, Puy de SANCY, etc...).

Les vitesses ascendantes ou descendantes, que j'ai mesurées pour des points du contour de ces masses nuageuses bourgeonnantes, sont du même ordre de grandeur que celles fournies par les autres métodes, en particulier par les planeurs eux-même. La fig.1 donne un exemple de restitutions de trajectoires sur un Cu bourgeonnant très puissant au dessus du Puy de SANCY. Ces cumulus sont de grosses bulles d'air relativement chaud et humide, où les vitesses verticales oscillent en moyenne autour de 2 à 3 mètres par seconde, atteignant exceptionnellement 10 mètres seconde.

Les films montrent avec une grande netteté, comment de la masse principale se détachent des protubérances tourbillonnaires qui constituent le bourgeonnement du cumulus.

Voici une remarque, qui a sans doute un certain intérêt, car elle permet de discerner facilement d'un seul coup d'oeil, dans un cumulus, quels sont les points où règne une ascendance active ou, au contraire, une descendance: j'ai observé sur tous mes films que, si un point d'une masse cumuliforme est le siège d'un mouvement ascendant rapide, le contour extérieur de cette masse est toujours

FIGURE A.4 – Les travaux expérimentaux de Kampé de Fériet, p. 4



- 207 -

net, dur, donnant l'impression d'un objet solide dont l'arête se découperait sur le ciel bleu; au contraire, dès que le régime descendant s'établit, le bord de la masse nuageuse devient mou, légèrement flou, souvent même un peu effiloché.

========

Mon attention a été attirée vers l'étude de la périodicité des tours cumuliformes dès ma campagne de 1933 dans le Massif du Mont Blanc. A SALLANCHES, le 10 Juillet 1933 par une très belle journée avec vent régulier de W.SW. je filmais, à la fin de la matinée, les Cu de beau temps qui coiffaient les sommets de la chaîne des Aravis, en particulier au dessus de la Tête Noire, petite montagne conique d'une altitude de 1600 mètres. Or l'étude de ce film m'a révélé que le sommet du Cu était animé d'un mouvement vertical périodique, d'une période de 20 minutes, la différence de Hauteur entre le maximum et le minimum étant d'environ 1500 mètres; la vitesse maxima du courant ascendant atteignait 4 m/sec.

C'est spécialement pour étudier cette périodicité des tours de Cu que j'ai entrepris mes 2 campagnes de 1934 et 1935 à la Station de Recherche Scientifiques du Jungfraujoch (Oberland Bernois). En plaçant l'appareil cinématographique sur le glacier du Joch, situé entre la Jungfrau et le Mönch à une altitude de 3500 mètres, il arrive fréquemment qu'on domine d'immense mers de nuages à sommets cumuliformes occupant toute la partie de la Suisse qui s'étend au nord du Massif de la Jungfrau jusqu'au Jura, aux Vosges et à la Forêt Noire, sur une distance de 200 à 250 kilomètres tout l'horizon moutonne, les tours cumuliformes s'élevant et s'abaissant, tout en roulant sur elle-même comme des vagues qui déferlent sur une mer parsemée de récifs.

Vous verrez tout à l'heure quelques uns de ces films. l'un des plus caractéristiques a été pris le 16 Août 1934 de 17 h 20 à 18 h 30; un anticyclone couvrait l'Europe Centrale; le ciel supérieur était clair dans tout le secteur N; le vent soufflait du S.SW; le gradient thermique entre Interlaken et le Joch était de 0°6 par 100 mètres; la base de la mer de nuages était vers 2000 mètres; les plus hauts sommets des tours culminaient à 3500 mètres. La fig.2 donne un extrait du dépouillement de ce film, en traçant toutes les 3 vues (30 secondes) le contour du sommet d'une dizaine de tours caractéristiques, surmontant le massif montagneux compris entre les vallées de Lauterbrunnen et de la Kander. La valeur moyenne de la période du mouvement vertical d'une tour est de 5 minutes.

Les influences thermiques ressortent nettement de la différence d'amplitude des mouvements des tours entre le début et la fin du film, qui s'est terminé presque au moment du coucher du soleil; au commencement les tours sont activement bourgeonnantes, peu à peu elles deviennent flasques et molles.

Pour appliquer la méthode à l'étude des courants dont l'origine principal est orographique, j'ai choisi le Mont CERVIN à cause de sa forme idéalement simple, d'une pureté presque géométrique; chacun connaît sa silhouette (fig.6) qui est celle d'une colossale pyramide à 4 faces (sommet 4505 m) avec des arêtes presques rectilignes et des faces quasi planes posée sur un socle bien dégagé et relativement plat, (2000 à 2500 m) où aucune autre montagne de même importance ne pointe à moins de 10 km. Les arêtes sont disposées de la manière suivante:

FIGURE A.5 – Les travaux expérimentaux de Kampé de Fériet, p. 5

1	arête	S.E.	(Furggen)	pente	43°	longueur	1,7 km
2	"	N.E.	(Hörnli)	"	39°	"	2 km
3	"	N.W.	(Z mutt)	"	37°	"	3 km
4	"	S.W.	(Lion)	"	36°	"	1,5 km

Pendant ma campagne d'été de 1935 l'appareil cinématographique était placé soit à ZERMATT (altitude 1600 m) soit sur le RIFFELBERG (altitude 2500 m) à une distance du sommet de 8 à 10 km. Dans tous les films le vent vient de droite vers la gauche et frappe la face comprise entre l'arête de ZMUTT et l'arête du HÖRNLI.

L'écoulement de l'air autour du CERVIN est visualisé d'une part par les nuages préexistants dans le courant atmosphérique général et contournant la pyramide, d'autre part par les nuages prenant naissance sur la montagne elle- même. Le sillage est en particulier rendu très nettement visible par un nuage se formant sur l'arête du HÖRNLI, par l'effet d'une chute brusque de pression; cette discontinuité de pression est particulièrement accentuée près du refuge SOLVAY situé à 4000 mètres d'altitude, en un point formant éperon sur l'arête du HÖRNLI; parfois quand la formation du nuage de sillage cesse partout ailleurs, elle persiste en ce seul point, d'où se détache un filet nuageux faisant penser à une fumée. Le nuage de sillage tourne sur lui-même en un gros rouleau tourbillonnaire T_1 (voir le schéma de la fig. 6) comportant un courant descendant D'D et un courant de retour R'R ; souvent il se dissout dans la zône descendante; au delà de la zône claire D'D un nuage manifeste un second rouleau tourbillonnaire T_2 tournant sur lui-même dans le même sens que le premier. Par un vent de 5 à 10 m/sec, venant du N à W, la zône claire du courant descendant se place à 2 km du sommet; l'épaisseur des rouleaux tourbillonnaires est d'environ 500 mètres; le centre du second rouleau est vers 4 km.

Les fig. 3, 4, 5 donnent, à titre d'exemples, quelques unes des 94 trajectoires relevées sur un film enregistré le 10 Août 1935 de 12 h 30 à 15 h 20. L'intervalle entre deux points consécutifs est de 5 sec. Une dépression s'était déplacée vers la Baltique; la Suisse était couverte par une traîne, affaiblie par l'anticyclone qui se développait en Europe occidentale; l'air maritime se transformait en air continental; à l'altitude de 4000 mètres le vent soufflait de W à NW à une vitesse de 6 m/sec.

La forme géométrique idéalement simple du CERVIN rend suggestive la comparaison de l'écoulement déduit des films avec l'écoulement observé autour d'une maquette dans une soufflerie. Dans la grande Soufflerie de l'Institut de Mécanique des Fluides (diamètre de la veine 2,20 m. vitesse maxima du courant d'air 67 m/sec) la maquette destinée à schématiser le CERVIN (fig.6) était tout simplement une pyramide à 4 faces planes, posée sur un plancher horizontal plan; cette pyramide a une hauteur de 0,40 m; sa base rectangulaire a comme côtés A_1A_2 = 42 cm (face Est) et A_2A_3 = 68 cm (face Nord).

On a fait deux séries d'essais, la première avec le vent frappant la face SA_2A_3 selon un angle $i = 15^\circ$ (qui correspond à un vent N.), la seconde avec un angle $i = 59^\circ$ (qui correspond à un vent NW, frappant de plein fouet l'arête de ZMUTT); la vitesse du courant d'air variait de 10 à 20 m/sec.

On a commencé par déterminer les limites du sillage, en mesurant la pression totale en 600 points; dans la veine de la Soufflerie loin de tout obstacle la pression totale demeure constante; dès qu'on pénètre dans le sillage elle diminue brusquement et devient en même temps turbulente. La fig. 8 donne, pour $i = 15^\circ$, les courbes limites du sillage dans les plans verticaux 0, 1, 2, 3, 4 normaux

FIGURE A.6 – Les travaux expérimentaux de Kampé de Fériet, p. 6

au vent indiqués sur la fig. 7; on voit que la hauteur verticale du sillage passe par un maximum dans le plan 3, à une distance de 0,60 m du sommet.

On a ensuite exploré le champ des vitesses à l'intérieur du sillage avec des fumées et avec des fils de soie; vous verrez tout à l'heure un film dû à mon Collaborateur M.H. GUILLEMET, montrant le résultat de l'exploration avec un fil de soie, pour une vitesse de 16 m/sec. Toutes les circonstances observées pour l'écoulement atmosphérique se sont fidèlement reproduites; nous avons retrouvé le tourbillon T_1 avec son courant de retour R'R ainsi que le courant descendant D'D (situé à environ 0,80 m du sommet).

En outre, fait qui avait échappé à mes observations autour du CERVIN, j'ai découvert l'existence d'un tourbillon hélicoidal TH, délimité très nettement et d'une stabilité tout à fait remarquable. Sur le film vous verrez le fil de soie, qui oscille autour de l'horizontale dans le courant général, tourner indéfiniment comme un moulinet, lorsque son point d'attache se place au centre de ce tourbillon.

Le tourbillon TH prend naissance du côté de l'arête SA_3 (ZMUTT) et occupe tout le bas du dièdre formé par le sol et la face SA_2A_3, avec un diamètre de 0,15 m environ et une vitesse de rotation de 8 à 10 tours seconde. Il se distingue nettement du rouleau classique, placé du côté au vent d'un obstacle normal au vent; en effet les trajectoires sont des hélices et non des cercles; l'air progresse tout en tournant. Le tourbillon T H franchit ainsi l'arête SA_2, se détache de la pyramide et continue à se manifester très loin en arrière dans le sillage au contact du sol plan; il ressemble donc beaucoup aux deux tourbillons marginaux prenant naissance aux extrémités des ailes d'un avion.

Après avoir découvert ces faits en Soufflerie, j'ai repris l'étude de mes films de nuages; je crois pouvoir relever des indices de l'existence de ce tourbillon dans l'atmosphère.

Je vous recommande d'examiner attentivement à ce point de vue le film de la série IV, enregistré le 17 Août 1935, de 10 h 43 à 12 h 25; (air contiental stagnant, progressivement surmonté par de l'air maritime, commandé par une dépression abordant la Grande Bretagne; dès 10 h le ciel se couvre, par W , de bancs de Cist.) On y voit des petits nuages fugitifs, apparaissant au bas du CERVIN, vers l'arête de ZMUTT, ne montant pas comme le feraient des nuages d'ascendance, mais tournant sur eux-mêmes en se rapprochant de l'arête du HÖRNLI, qu'ils franchissent brusauement; ils me paraissent être dû au tourbillon T H.

Maintenant que mon attention est éveillée, dans la compagne que je projette pour l'été 1936, j'étudierai tout particulièrement ce point.

J'ai été le premier surpris du bon accord qualitatif et quantitatif de l'écoulement autour d'une maquette de 0,40 m avec l'écoulement atmosphérique autour de la pyramide du CERVIN qui a 2000 m.

A première vue les conditions de similitude définies par les valeurs du paramètre de REYNOLDS

$$R = \frac{V\,d}{\nu}$$

paraissent violées dans une proportion extravagante, puisque le rapport des coefficients atteint 5000 pour une même vitesse V. Mais ceci n'est vrai que si on prend pour les deux écoulements la même valeur du coefficient de viscosité ν. Or, selon les vues si fécondes

FIGURE A.7 – Les travaux expérimentaux de Kampé de Fériet, p. 7

de M. WEHRLE, il convient sans doute d'adopter dans chaque cas pour ν la valeur qui correspond à l'échelle des mouvements étudiés; à l'échelle de la soufflerie $\nu = 0{,}18$ correspondant à la viscosité moléculaire est sans doute déjà trop faible; à l'échelle de l'aérologie (tourbillons de quelques centaines de mètres de diamètre) il faut donner à ν une valeur énormément plus grande, $\nu = 10^4$ ou 10^5 par exemple, comme cela semble résulter en particulier des mesures du Professeur WILHELM SCHMIDT.

Le nombre de REYNOLDS devient alors du même ordre de grandeur pour la maquette et pour le CERVIN.

========

En attendant une étude détaillée que je publierai ailleurs ces quelques exemples n'avaient d'autre but que de vous montrer les possibilités que l'enregistrement cinématographique ultra-lent des nuages offre pour l'étude des mouvements atmosphériques; je pense que le Vol sans Moteur peut trouver dans cette méthode une source très féconde de documentation.

FIGURE A.8 – Les travaux expérimentaux de Kampé de Fériet, p. 8

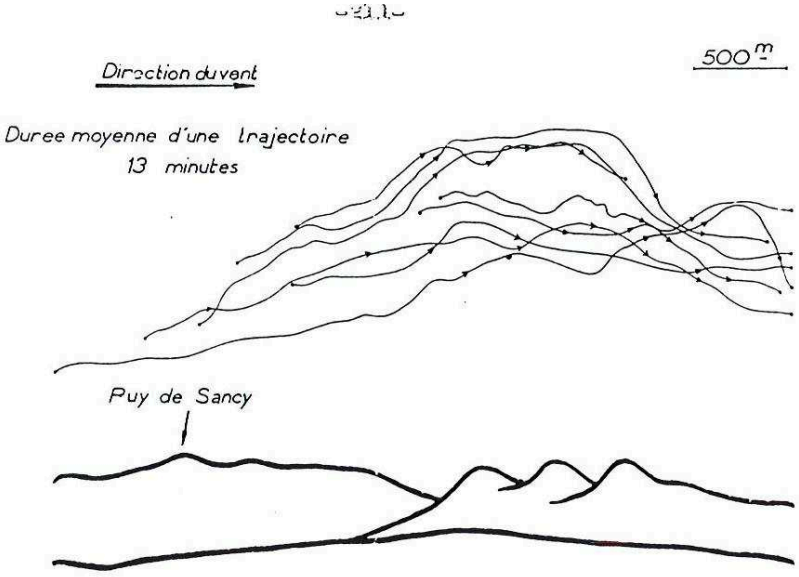


Abb. 1

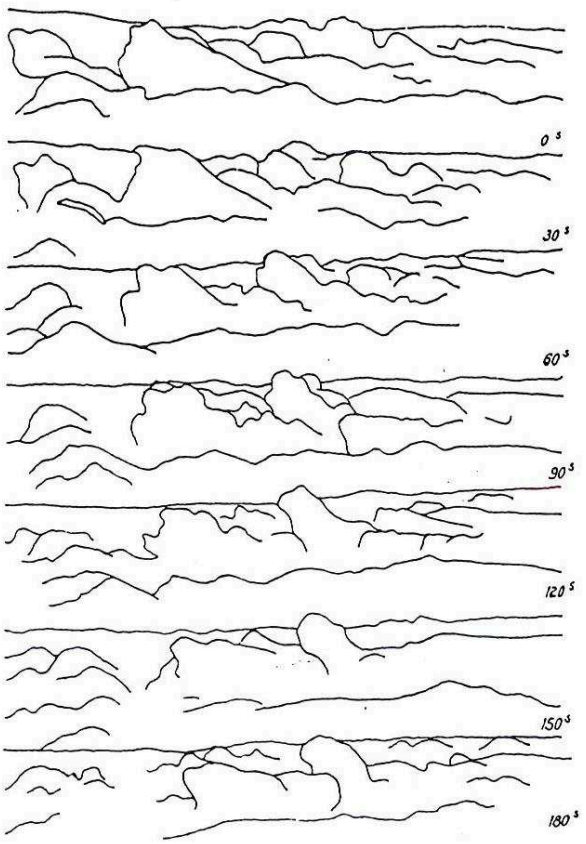


Abb. 2

FIGURE A.9 – Les travaux expérimentaux de Kampé de Fériet, p. 9

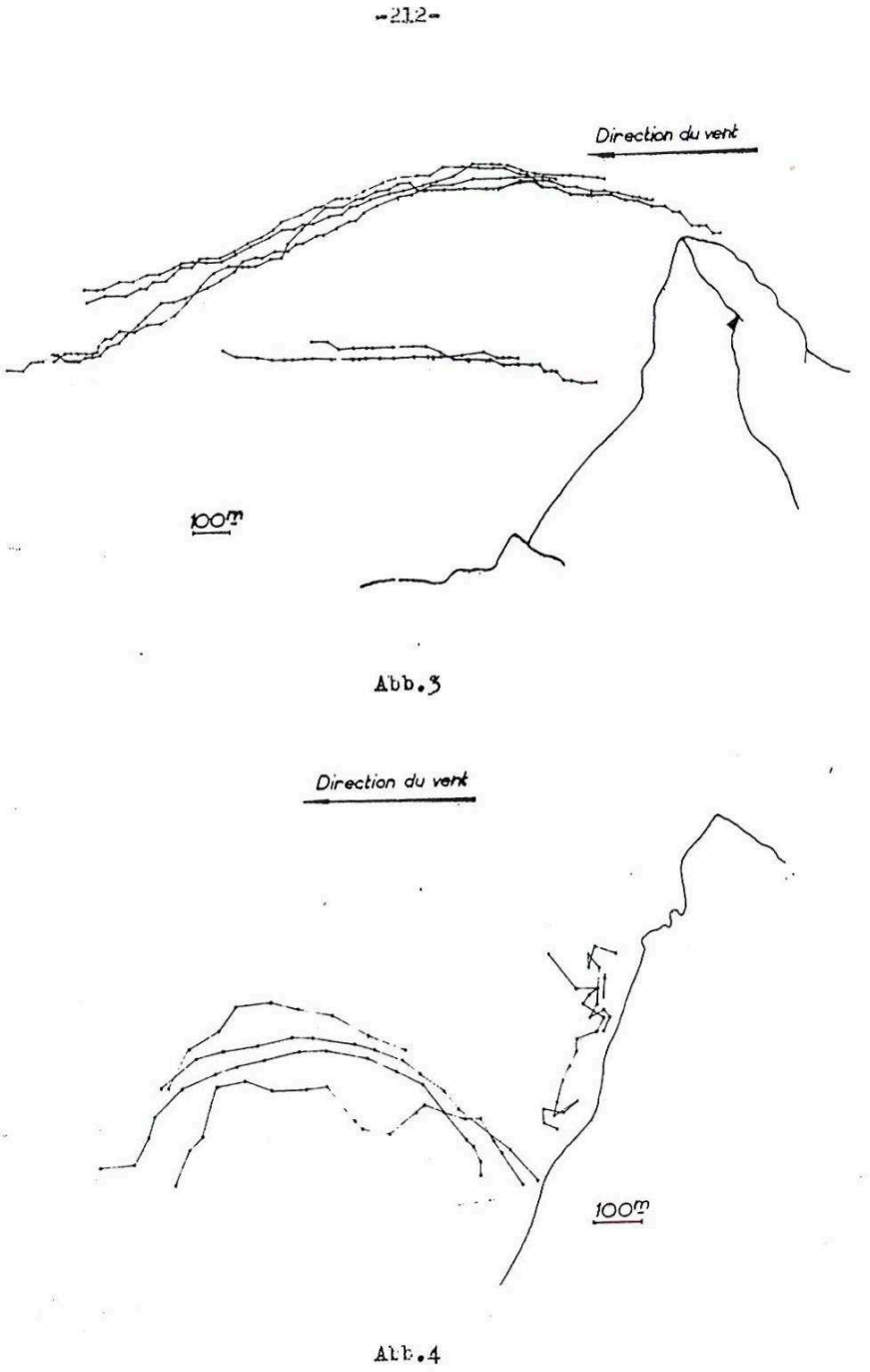
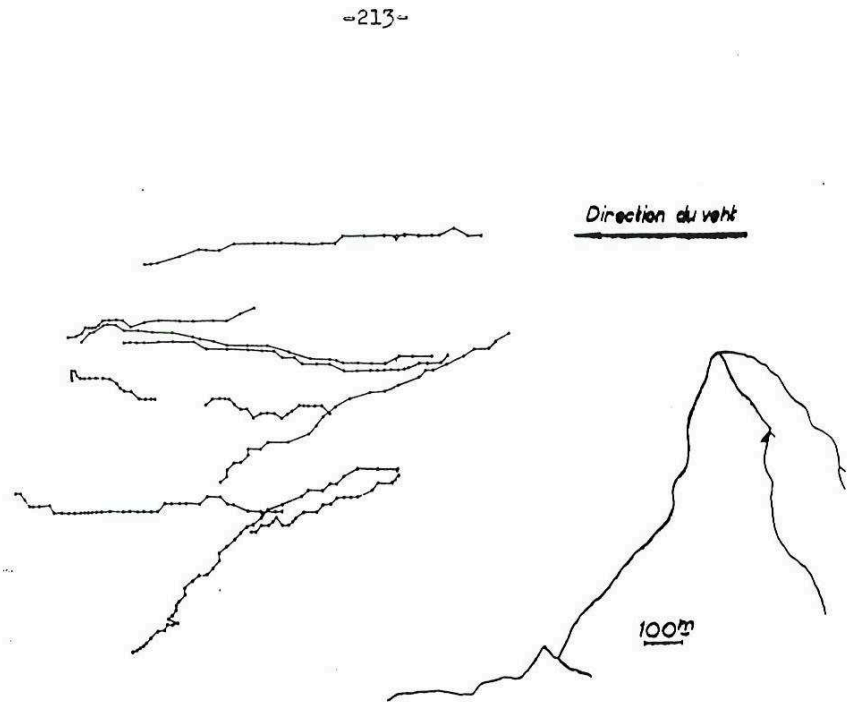


FIGURE A.10 – Les travaux expérimentaux de Kampé de Fériet, p. 10



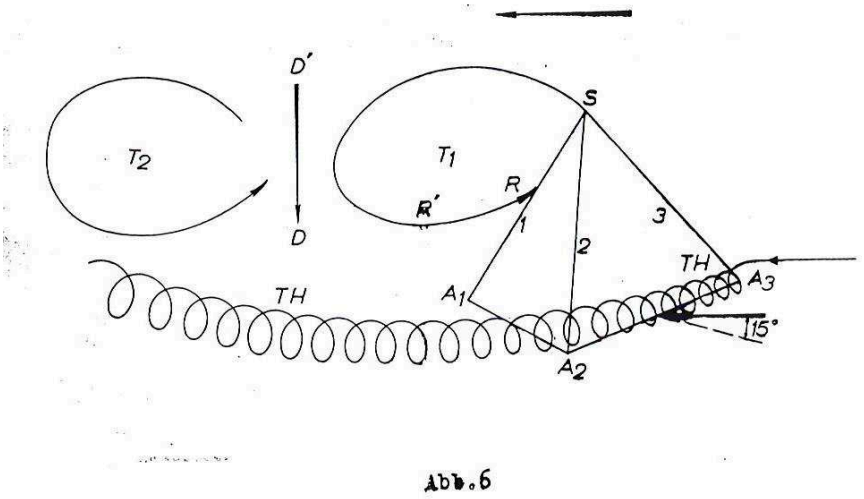


FIGURE A.11 – Les travaux expérimentaux de Kampé de Fériet, p. 11

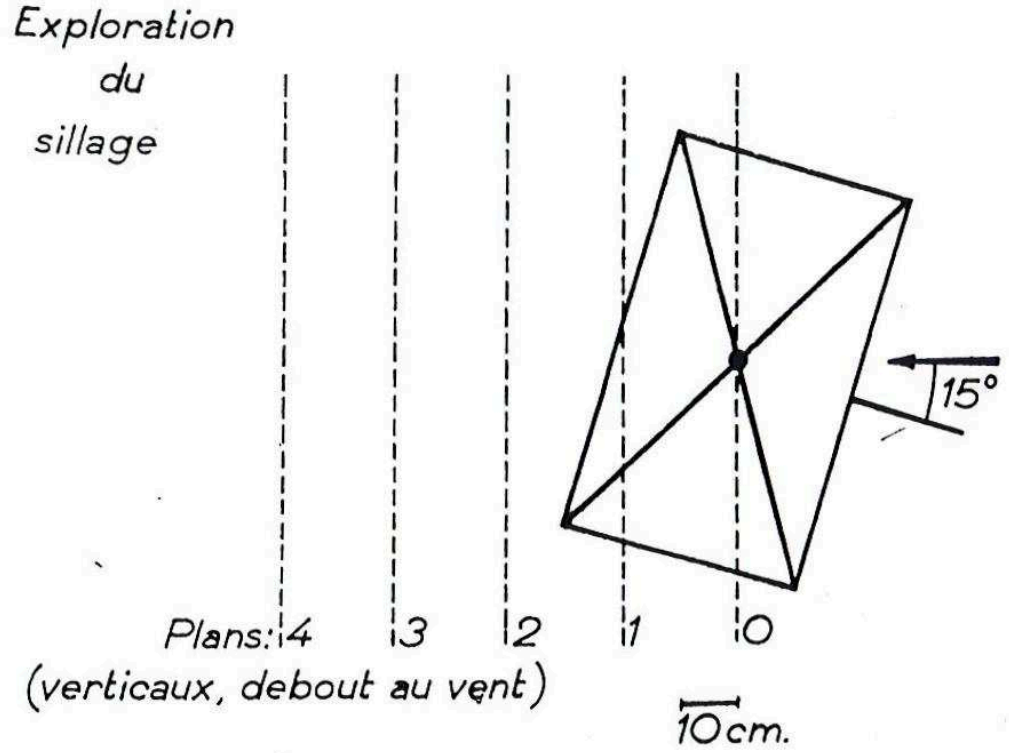


Abb.7

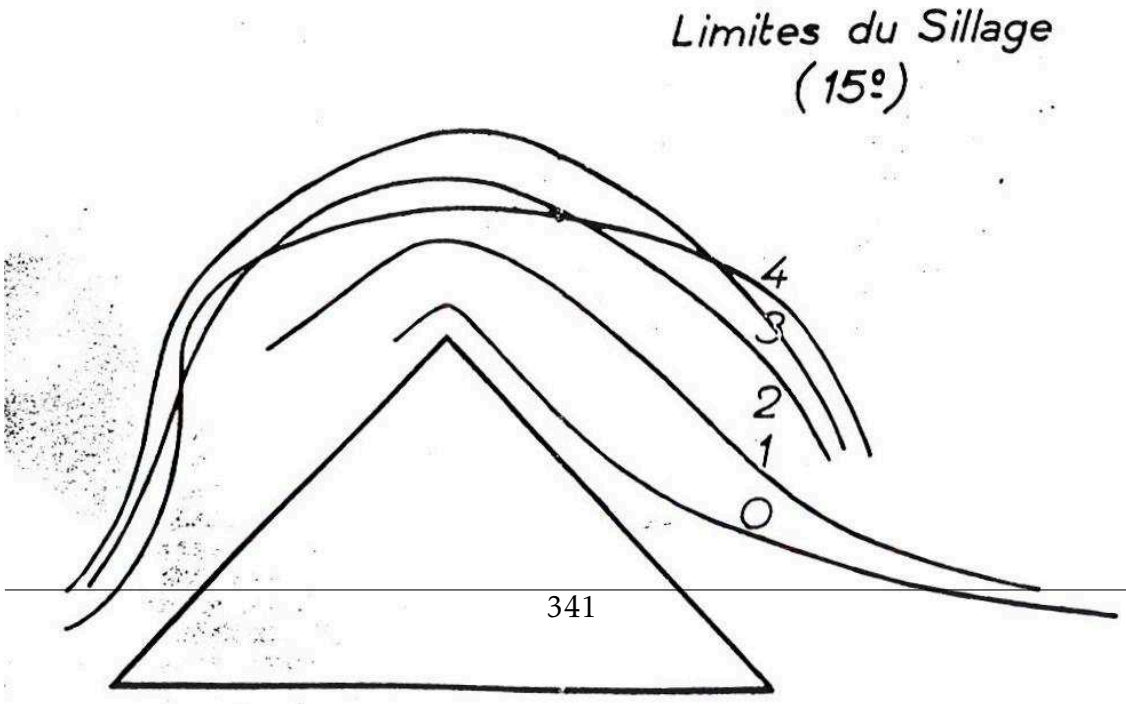


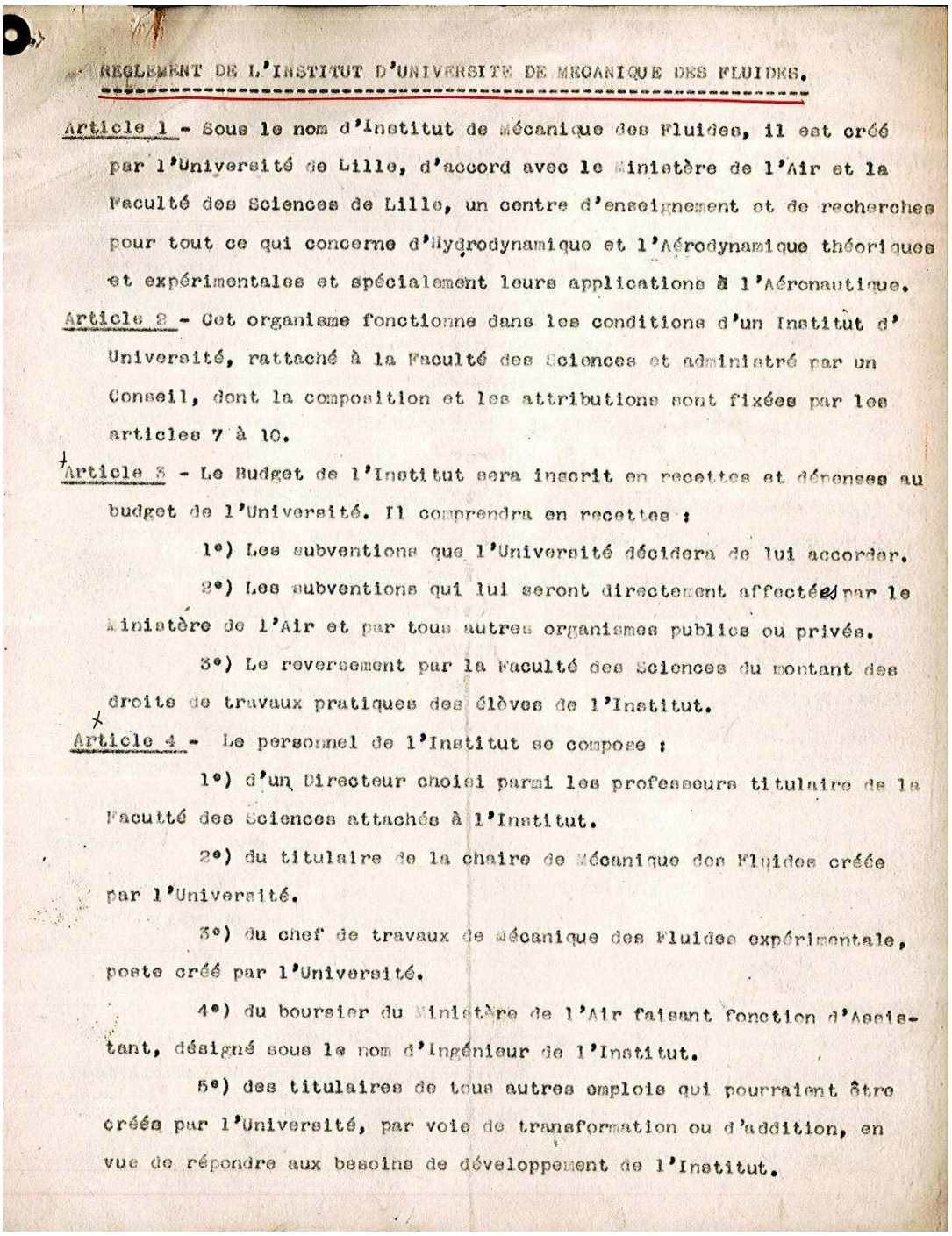
Abb.8

FIGURE A.12 – Les travaux expérimentaux de Kampé de Fériet, p. 12

Annexe B

Le règlement intérieur de l'IMFL, date non précisée

Ce document provient des Archives de l'ONERA Lille.



REGLEMENT DE L'INSTITUT D'UNIVERSITE DE MECANIQUE DES FLUIDES.

Article 1 - Sous le nom d'Institut de Mécanique des Fluides, il est créé par l'Université de Lille, d'accord avec le Ministère de l'Air et la Faculté des Sciences de Lille, un centre d'enseignement et de recherches pour tout ce qui concerne d'Hydrodynamique et l'Aérodynamique théoriques et expérimentales et spécialement leurs applications à l'Aéronautique.

Article 2 - Cet organisme fonctionne dans les conditions d'un Institut d'Université, rattaché à la Faculté des Sciences et administré par un Conseil, dont la composition et les attributions sont fixées par les articles 7 à 10.

Article 3 - Le Budget de l'Institut sera inscrit en recettes et dépenses au budget de l'Université. Il comprendra en recettes :

1°) Les subventions que l'Université décidera de lui accorder.

2°) Les subventions qui lui seront directement affectées par le Ministère de l'Air et par tous autres organismes publics ou privés.

3°) Le reversement par la Faculté des Sciences du montant des droits de travaux pratiques des élèves de l'Institut.

Article 4 - Le personnel de l'Institut se compose :

1°) d'un Directeur choisi parmi les professeurs titulaire de la Faculté des Sciences attachés à l'Institut.

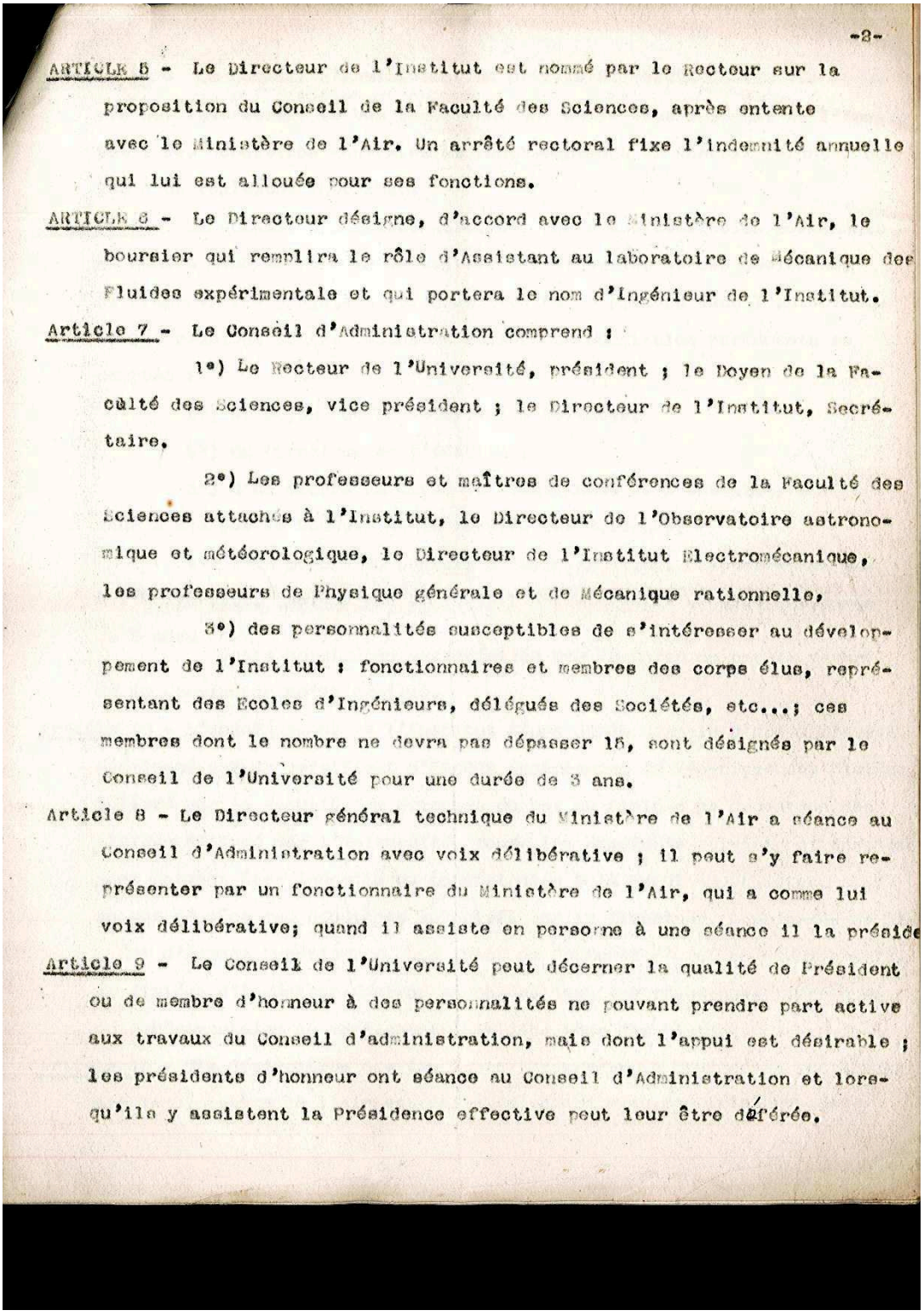
2°) du titulaire de la chaire de Mécanique des Fluides créée par l'Université.

3°) du chef de travaux de Mécanique des Fluides expérimentale, poste créé par l'Université.

4°) du boursier du Ministère de l'Air faisant fonction d'Assistant, désigné sous le nom d'Ingénieur de l'Institut.

5°) des titulaires de tous autres emplois qui pourraient être créés par l'Université, par voie de transformation ou d'addition, en vue de répondre aux besoins de développement de l'Institut.

FIGURE B.1 – Le règlement intérieur de l'IMFL, p. 1



-2-

ARTICLE 5 - Le Directeur de l'Institut est nommé par le Recteur sur la proposition du Conseil de la Faculté des Sciences, après entente avec le Ministère de l'Air. Un arrêté rectoral fixe l'indemnité annuelle qui lui est allouée pour ses fonctions.

ARTICLE 6 - Le Directeur désigne, d'accord avec le Ministère de l'Air, le boursier qui remplira le rôle d'Assistant au laboratoire de Mécanique des Fluides expérimentale et qui portera le nom d'Ingénieur de l'Institut.

Article 7 - Le Conseil d'Administration comprend :

1°) Le Recteur de l'Université, président ; le Doyen de la Faculté des Sciences, vice président ; le Directeur de l'Institut, Secrétaire.

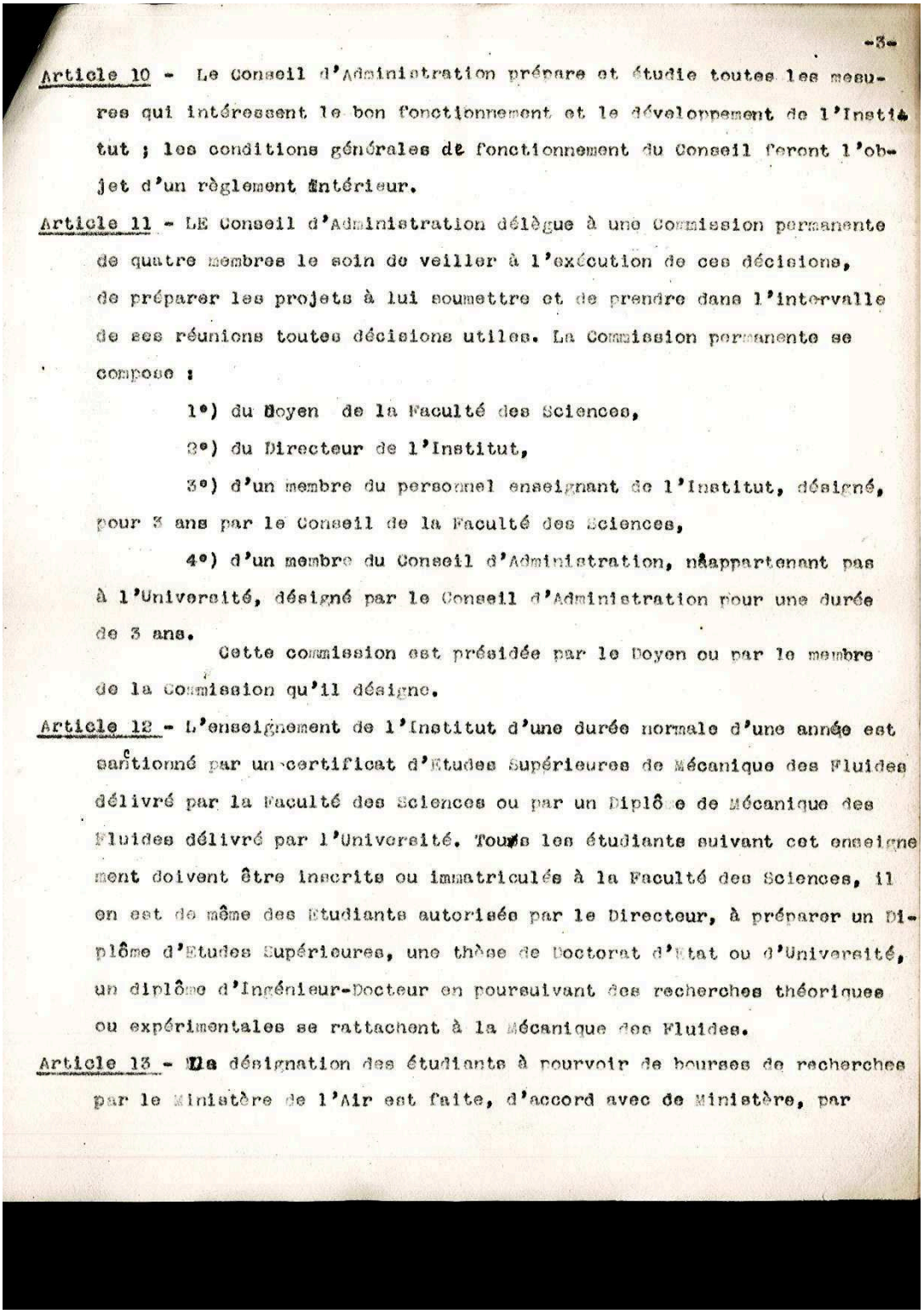
2°) Les professeurs et maîtres de conférences de la Faculté des Sciences attachés à l'Institut, le Directeur de l'Observatoire astronomique et météorologique, le Directeur de l'Institut Electromécanique, les professeurs de Physique générale et de Mécanique rationnelle,

3°) des personnalités susceptibles de s'intéresser au développement de l'Institut : fonctionnaires et membres des corps élus, représentant des Ecoles d'Ingénieurs, délégués des Sociétés, etc...; ces membres dont le nombre ne devra pas dépasser 15, sont désignés par le Conseil de l'Université pour une durée de 3 ans.

Article 8 - Le Directeur général technique du Ministère de l'Air a séance au Conseil d'Administration avec voix délibérative ; il peut s'y faire représenter par un fonctionnaire du Ministère de l'Air, qui a comme lui voix délibérative; quand il assiste en personne à une séance il la préside

Article 9 - Le Conseil de l'Université peut décerner la qualité de Président ou de membre d'honneur à des personnalités ne pouvant prendre part active aux travaux du Conseil d'administration, mais dont l'appui est désirable ; les présidents d'honneur ont séance au Conseil d'Administration et lorsqu'ils y assistent la Présidence effective peut leur être déférée.

FIGURE B.2 – Le règlement intérieur de l'IMFL, p. 2



-3-

Article 10 - Le Conseil d'Administration prépare et étudie toutes les mesures qui intéressent le bon fonctionnement et le développement de l'Institut ; les conditions générales de fonctionnement du Conseil feront l'objet d'un règlement intérieur.

Article 11 - LE Conseil d'Administration délègue à une Commission permanente de quatre membres le soin de veiller à l'exécution de ces décisions, de préparer les projets à lui soumettre et de prendre dans l'intervalle de ses réunions toutes décisions utiles. La Commission permanente se compose :

1°) du Doyen de la Faculté des Sciences,

2°) du Directeur de l'Institut,

3°) d'un membre du personnel enseignant de l'Institut, désigné, pour 3 ans par le Conseil de la Faculté des Sciences,

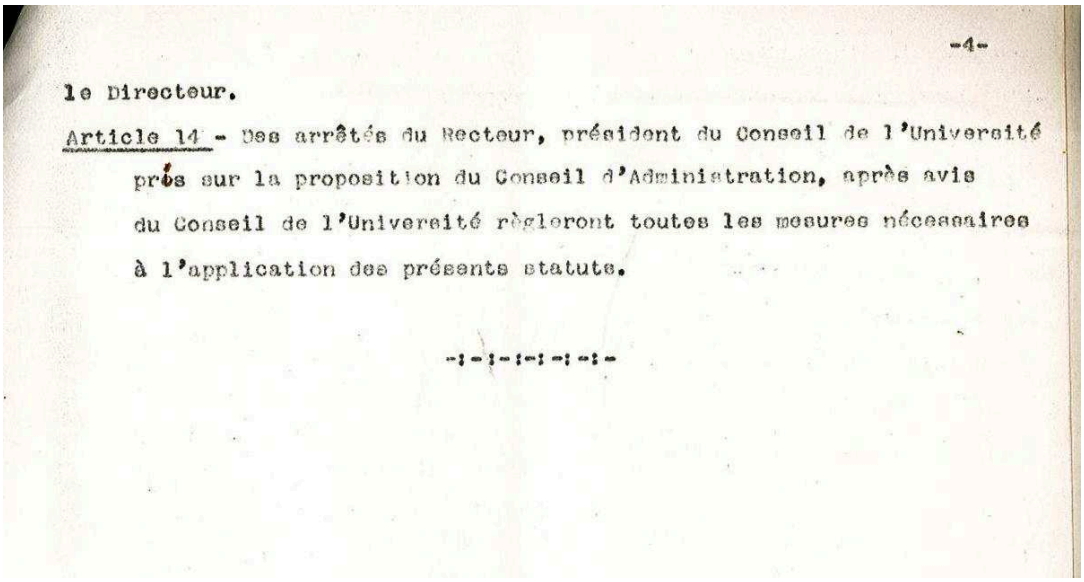
4°) d'un membre du Conseil d'Administration, nâappartenant pas à l'Université, désigné par le Conseil d'Administration pour une durée de 3 ans.

Cette commission est présidée par le Doyen ou par le membre de la Commission qu'il désigne.

Article 12 - L'enseignement de l'Institut d'une durée normale d'une année est sanctionné par un certificat d'Etudes Supérieures de Mécanique des Fluides délivré par la Faculté des Sciences ou par un Diplôme de Mécanique des Fluides délivré par l'Université. Tous les étudiants suivant cet enseignement doivent être inscrits ou immatriculés à la Faculté des Sciences, il en est de même des Etudiants autorisés par le Directeur, à préparer un Diplôme d'Etudes Supérieures, une thèse de Doctorat d'Etat ou d'Université, un diplôme d'Ingénieur-Docteur en poursuivant des recherches théoriques ou expérimentales se rattachent à la Mécanique des Fluides.

Article 13 - La désignation des étudiants à pourvoir de bourses de recherches par le Ministère de l'Air est faite, d'accord avec de Ministère, par

FIGURE B.3 – Le règlement intérieur de l'IMFL, p. 3



-4-

le Directeur.

Article 14 - Des arrêtés du Recteur, président du Conseil de l'Université près sur la proposition du Conseil d'Administration, après avis du Conseil de l'Université règleront toutes les mesures nécessaires à l'application des présents statuts.

-:-:-:-:-:-:-

FIGURE B.4 – Le règlement intérieur de l'IMFL, p. 4

Annexe C

Les collaborateurs de l'IMFL : quelques photos

La sélection des photos présentée dans cette annexe provient des Archives de l'ONERA Lille.

Figure C.1 – Caricature de Kampé de Fériet, collection Gryson

FIGURE C.2 – Caricature de Martinot-Lagarde, collection Gryson

FIGURE C.3 – Caricature de Fauquet, collection Gryson

FIGURE C.4 – Caricature de Guienne, collection Gryson

FIGURE C.5 – Caricature de Guillemet, collection Gryson

FIGURE C.6 – Caricature de Rollin, collection Gryson

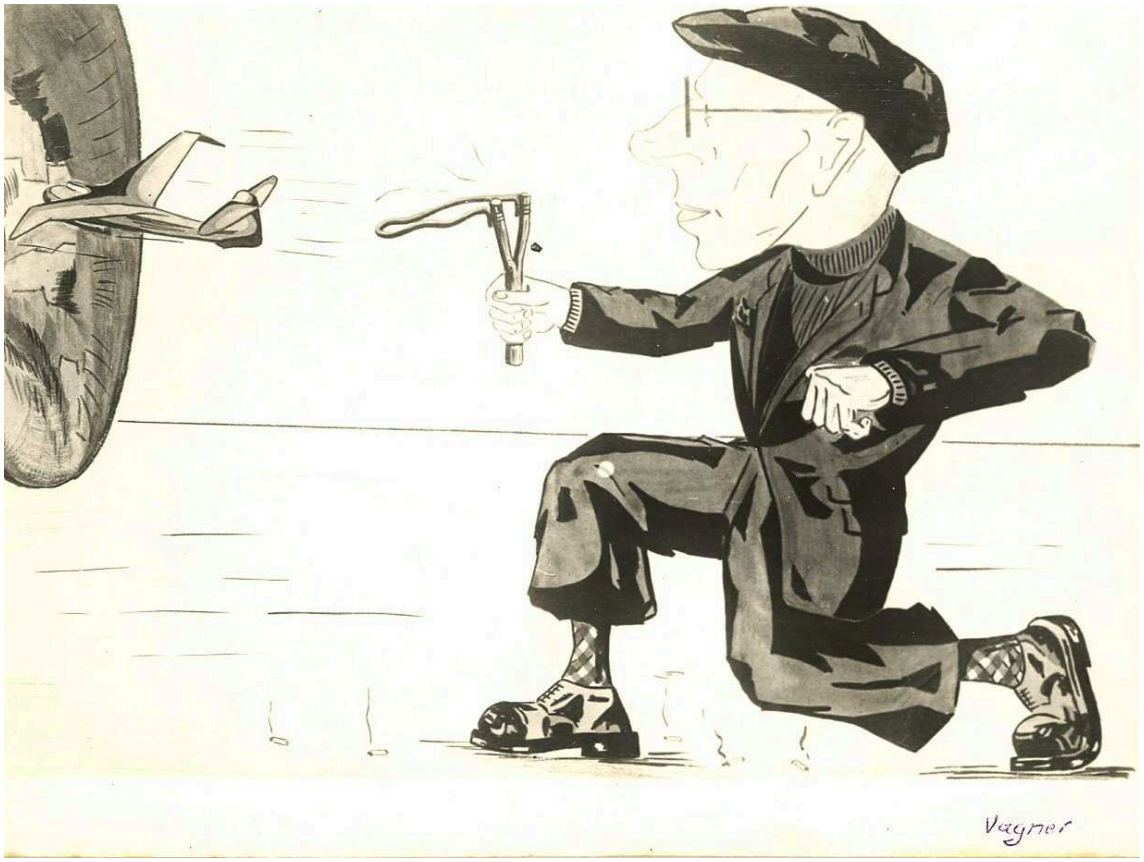


FIGURE C.7 – Caricature de Vagner, collection Gryson

FIGURE C.8 – Kampé de Fériet et Henri Mignet (créateur du Pou du Ciel) : terrain d'aviation de Lille-Ronchin pour le montage de l'anémoclinomètre IMFL sur le Pou du Ciel. Année non précisée.

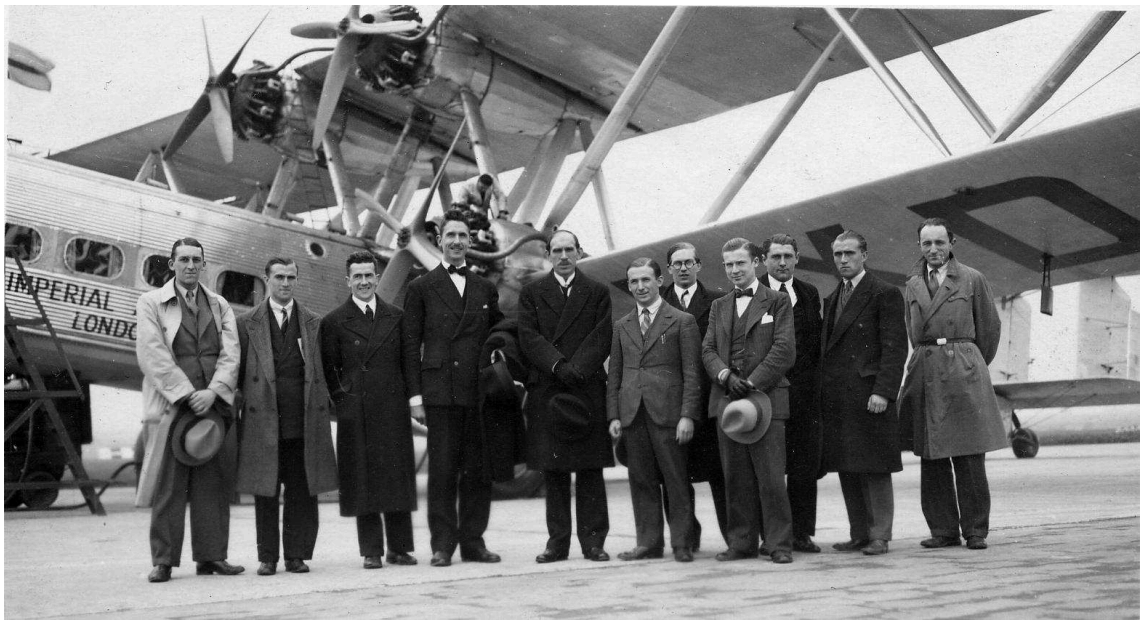


FIGURE C.9 – Kampé de Fériet et Martinot-Lagarde dans une conférence dans les années 1934-1936 (Londres ?).

FIGURE C.10 – Les collaborateurs de l'IMFL pendant une préparation d'une campagne d'aérologie à l'aide d'un cerf volant au cap gris nez. Année non précisée.

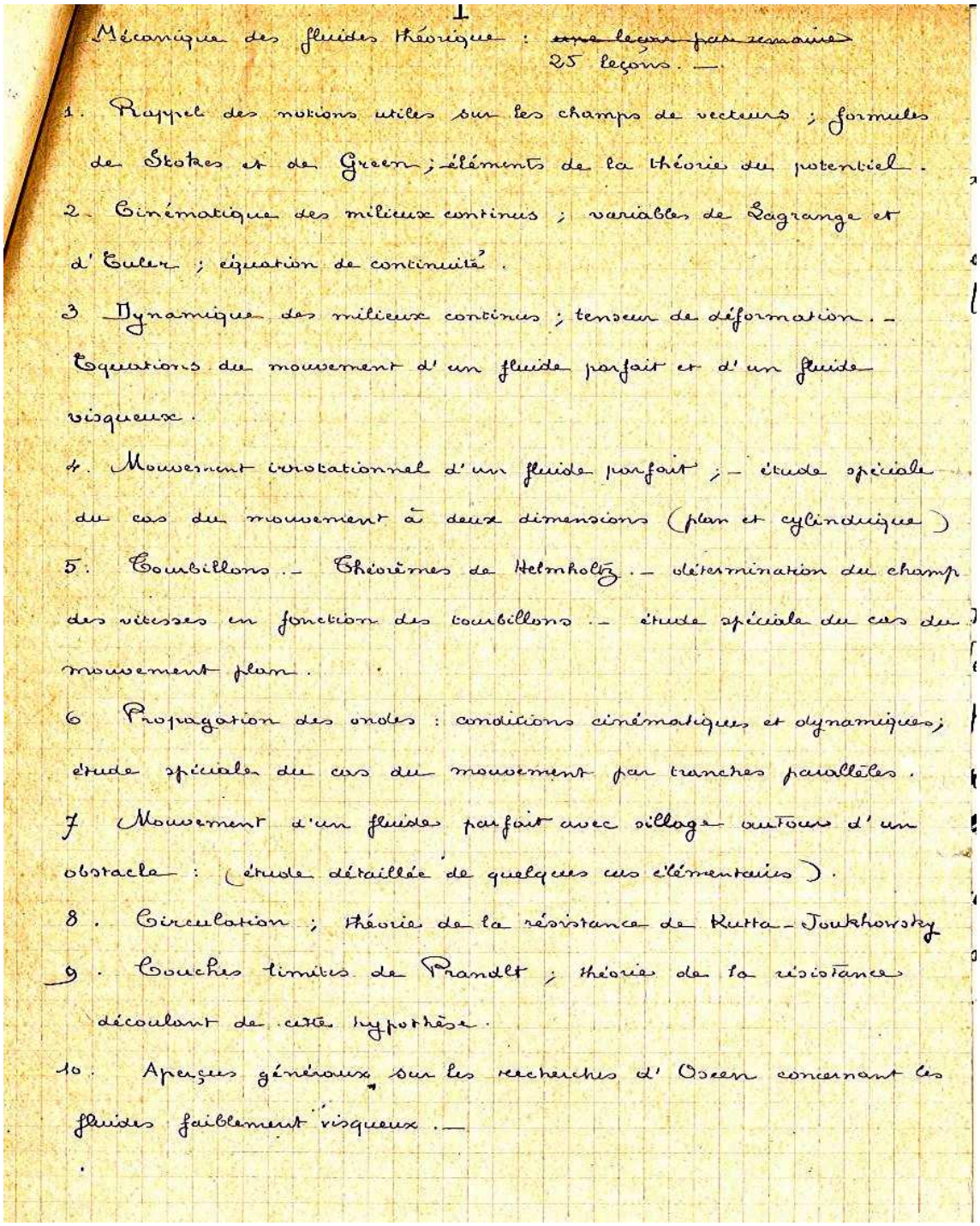
FIGURE C.11 – Le voyage Lille-Toulouse à vélo, collection Gryson (1940)

FIGURE C.12 – Martinot-Lagarde, Kampé de Fériet et Gérard Gontier (en arrière plan). Ce dernier succédera à Martinot-Lagarde en 1968. Photo datée de 1977.

Annexe D

Enseignements, séminaires et examens à l'IMFL

L'ensemble des documents présentés dans cette annexe provient du fonds Kampé de Fériet des Archives de l'ONERA Lille.



1

Mécanique des fluides théorique : ~~une leçon par semaine~~
25 leçons. —

1. Rappel des notions utiles sur les champs de vecteurs ; formules de Stokes et de Green ; éléments de la théorie du potentiel.

2. Cinématique des milieux continus ; variables de Lagrange et d'Euler ; équation de continuité.

3 Dynamique des milieux continus ; tenseur de déformation. — Equations du mouvement d'un fluide parfait et d'un fluide visqueux.

4. Mouvement irrotationnel d'un fluide parfait ; — étude spéciale du cas du mouvement à deux dimensions (plan et cylindrique)

5. Tourbillons. — Théorèmes de Helmholtz. — détermination du champ des vitesses en fonction des tourbillons. — étude spéciale du cas du mouvement plan.

6 Propagation des ondes : conditions cinématiques et dynamiques ; étude spéciale du cas du mouvement par tranches parallèles.

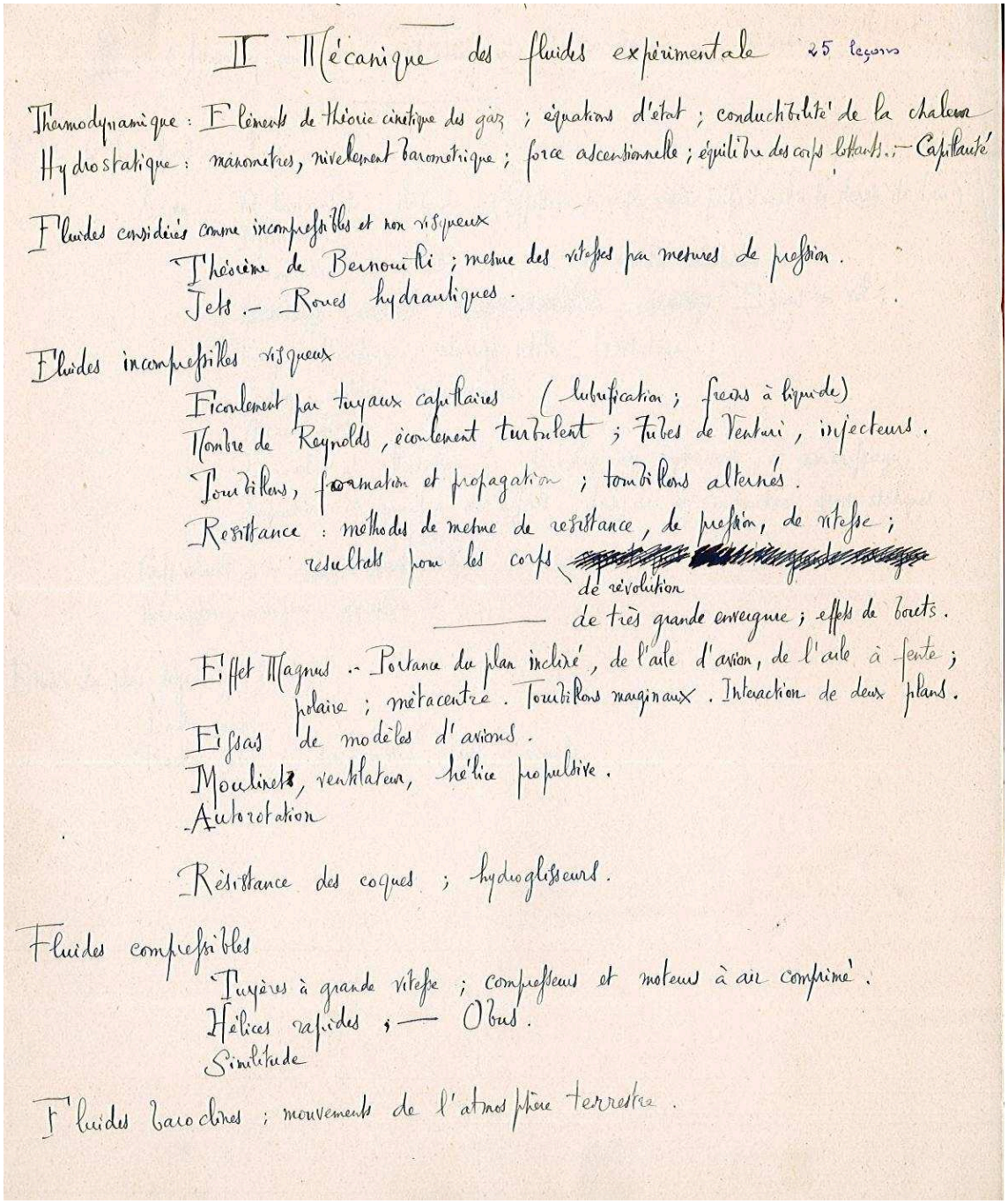
7 Mouvement d'un fluides parfait avec sillage autour d'un obstacle : (étude détaillée de quelques cas élémentaires).

8. Circulation ; théorie de la résistance de Kutta-Joukhowsky

9. Couches limites de Prandlt ; théorie de la résistance découlant de cette hypothèse.

10. Aperçues généraux sur les recherches d'Oseen concernant les fluides faiblement visqueux. —

FIGURE D.1 – Programme du cours de mécanique des fluides théorique



II Mécanique des fluides expérimentale 25 leçons

Thermodynamique : Eléments de théorie cinétique des gaz ; équations d'état ; conductibilité de la chaleur
Hydrostatique : manomètres, nivellement barométrique ; force ascensionnelle ; équilibre des corps flottants ; — Capillarité

Fluides considérés comme incompressibles et non visqueux
Théorème de Bernoulli ; mesure des vitesses par mesures de pression.
Jets. — Roues hydrauliques.

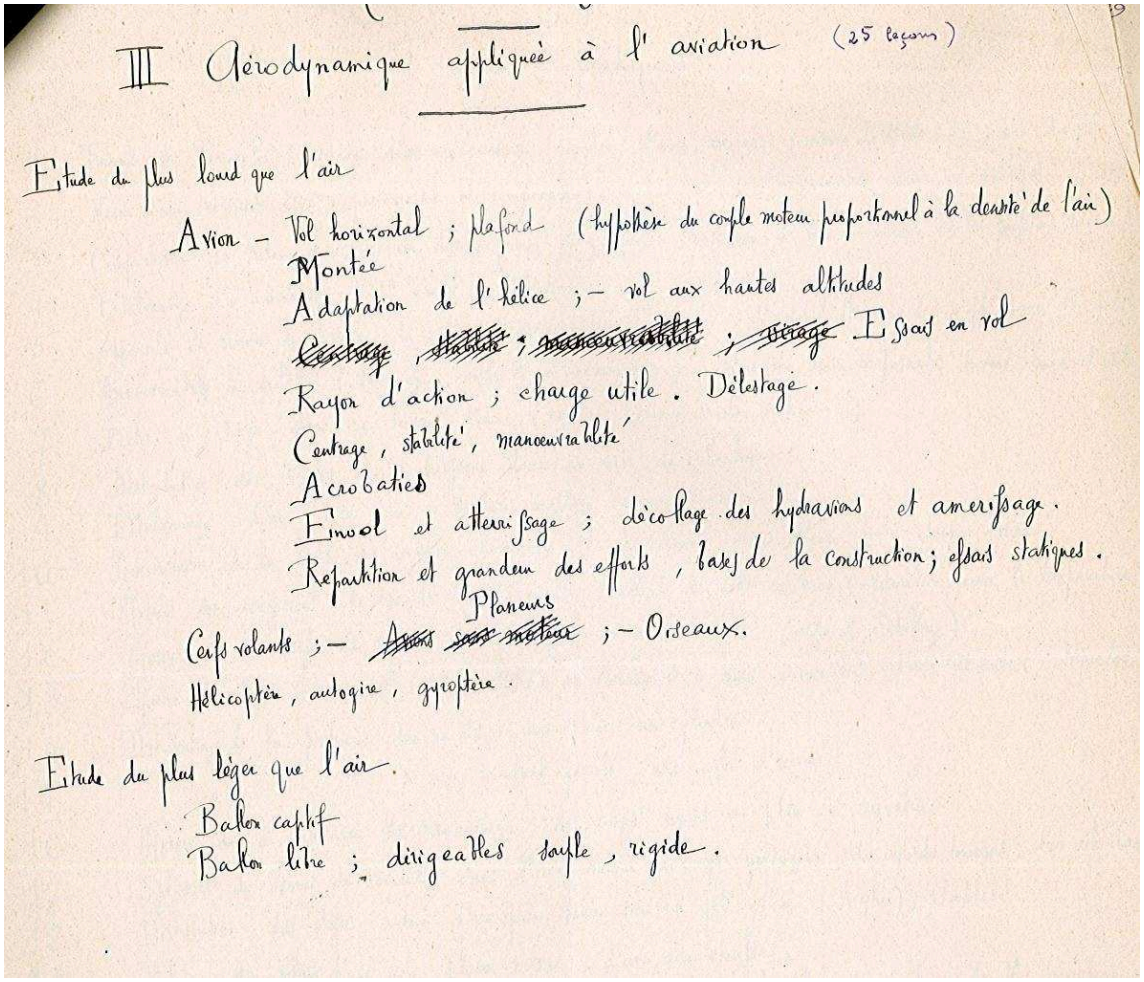
Fluides incompressibles visqueux
Ecoulement par tuyaux capillaires (lubrification ; freins à liquide)
Nombre de Reynolds, écoulement turbulent ; Tubes de Venturi, injecteurs.
Tourbillons, formation et propagation ; tourbillons alternés.
Résistance : méthodes de mesure de résistance, de pression, de vitesse ;
résultats pour les corps de révolution
——— de très grande envergure ; effets de bouts.
Effet Magnus. — Portance du plan incliné, de l'aile d'avion, de l'aile à fente ; polaire ; métacentre. Tourbillons marginaux. Interaction de deux plans.
Essais de modèles d'avions.
Moulinets, ventilateur, hélice propulsive.
Autorotation

Résistance des coques ; hydroglisseurs.

Fluides compressibles
Tuyères à grande vitesse ; compresseurs et moteurs à air comprimé.
Hélices rapides ; — Obus.
Similitude

Fluides barocliines ; mouvements de l'atmosphère terrestre.

FIGURE D.2 – Programme du cours de mécanique des fluides expérimentale



III Aérodynamique appliquée à l'aviation (25 leçons)

Etude du plus lourd que l'air

Avion – Vol horizontal ; plafond (hypothèse du couple moteur proportionnel à la densité de l'air)
Montée
Adaptation de l'hélice ; – vol aux hautes altitudes
~~Centrage~~, ~~stabilité~~ ; ~~manœuvrabilité~~ ; ~~virage~~ Essais en vol
Rayon d'action ; charge utile. Délestage.
Centrage, stabilité, manœuvrabilité
Acrobaties
Envol et atterrissage ; décollage des hydravions et amerrissage.
Répartition et grandeur des efforts, bases de la construction ; essais statiques.

Cerfs volants ; – ~~Avions sans moteur~~ Planeurs ; – Oiseaux.
Hélicoptère, autogire, gyroptère.

Etude du plus léger que l'air.
Ballon captif
Ballon libre ; dirigeables souple, rigide.

FIGURE D.3 – Programme du cours d'aérodynamique appliquée à l'aviation

UNIVERSITE DE LILLE

INSTITUT DE MECANIQUE DES FLUIDES

PROGRAMME DE L'EXAMEN DE MECANIQUE DES FLUIDES

DE L'INSTITUT INDUSTRIEL DU NORD (Deuxième année)

JUIN 1936

Lignes de courant et trajectoires: définition, équation différentielle, détermination expérimentale.- Lignes d'émission: définition, détermination expérimentale.
Exemple du mouvement défini par le roulement d'une circonférence sur une droite.

Dérivée en suivant le mouvement; définition, expression algébrique.- Calcul de l'accélération d'une particule.

Définition du vecteur tourbillon: calcul dans l'exemple du mouvement d'un solide.

Equation de continuité: démonstration; application aux fluides incompressibles.

Mouvement plan d'un fluide incompressible: fonction de courant. Calculer u v connaissant la fonction de courant (exemples du cours).

Distinction de la pâte, du fluide visqueux, du fluide non visqueux: hypothèses sur les forces intérieures.- Première loi de la statique (isotropie de la pression).- Deuxième loi (loi du gradient de pression) dans le cas où les forces extérieures à distance dérivent d'un potentiel.- Identité des surfaces équipotentielles, isobares, isostères, isothermes.

Equilibre de l'atmosphère, la distribution de la température supposée connue.

Loi d'Archimède: résultante des forces subies par un solide immergé.

Fluide incompressible: forces exercées sur une face d'une plaque plane immergée: module et point d'application de la résultante.- Loi de Pascal: constance de la différence de pression.

Equations de la dynamique des fluides non visqueux.- Ecoulement barotrope: définition; calcul de la fonction $\mathcal{P}$ dans le cas du gaz parfait en transformation isotherme.- Théorème de la conservation du tourbillon: démonstration dans le cas du mouvement plan.

Théorème de Bernoulli : démonstration du théorème relatif au mouvement permanent.
Application aux écoulements à partir d'un réservoir où le fluide est sensiblement immobile (ou en translation rectiligne uniforme)

Expression du théorème de Bernoulli pour un fluide incompressible; définition de la pression dynamique, de la pression motrice.- Loi de variation de la pression motrice suivant les normales à la trajectoire d'une particule.- Détermination d'une différence de pression motrice.

Mesure de la pression dynamique: tube de Pitot; erreur relative, erreur absolue sur la mesure de la vitesse au tube de Pitot; erreurs dûes à la turbulence.- Clinomètre à cylindre , à sphère.

Fluides visqueux: définition du coefficient de viscosité. Ecoulement par droites parallèles: exemple de l'écoulement par un tuyau cylindrique circulaire: loi de distribution de vitesse, loi de perte de pression motrice.- Viscosité cinématique; formule de dimensions du coefficient de viscosité cinématique. Ecoulement turbulent.

FIGURE D.4 – Programme de l'examen de mécanique des fluides de l'IDN, 1936

Théorème des grandeurs sans dimensions: démonstration sur un cas particulier, exemple: force subie par un solide immergé, en translation uniforme.

Définition de la traînée: coefficient unitaire de traînée, étude de l'écoulement autour de solides en translation uniforme ne subissant qu'une traînée: évolution du sillage autour d'une plaque plane,normale au courant, en fonction du nombre de Reynolds; distribution de la pression le long d'un cylindre profilé (comparaison entre l'expérience et le calcul sur fluide en mouvement irrotationnel); variation du coefficient de traînée de la sphère.

Portance et traînée d'une plaque plane; finesse; polaire rapportée à la direction du vent relatif. Polaire de Lilienthal ou polaire rapportée à la plaque.- Eléments d'un profil d'aile (corde repère, bord d'attaque, bord de fuite, ligne diamétrale, courbure, épaisseur relative); influence de la courbure et de l'épaisseur relative sur la forme de la polaire.- Loi de l'allongement [sans démonstration]

Dispositifs hypersustentateurs: volet de courbure, fente avant, volet crocodile.

Moment de tangage: coefficient unitaire de moment, relation entre le moment par rapport au bord d'attaque et la portance; définition et critérium de stabilité statique de tangage; influence de la position du centre de gravité.- Déplacement du centre de poussée avec l'incidence (moment à la portance nulle); ailes à double courbure.

Mécanique de l'avion en vol rectiligne. Minimum de vitesse, minimum de traction et minimum de puissance en vol horizontal.- Calcul approché du plafond et la vitesse ascensionnelle.

Hélice propulsive: éléments essentiels: pas et diamètre; représentation d'une hélice; rendement, coefficient de puissance, coefficient de traction, tangente de similitude: courbes caractéristiques.- Pas usuels.- Notions sur la compensation des hélices par rapport à la flexion et à la torsion.- Etude schématique de l'élément de pale: fonctionnement en propulseur ou en moulinet; influence de la finesse du profil sur le rendement de l'élément de pale.

Pompes et ventilateurs: coefficients de puissance, de pression, de débit; orifice équivalent réduit.

Turbines hydrauliques: coefficient de puissance, coefficient de vitesse, coefficient de vélocité.

Déversoirs: mesure du débit dans un canal.

Ecoulement des fluides incompressibles dans les tuyaux pleins: turbulence, distribution de la vitesse, loi de perte de charge; nombre de Reynolds critique.- Mesure du débit: diaphragmes et ajutages; calcul approché de la différence de pression motrice; sens de variation du coefficient d'étalonnage avec le rapport de contraction et le nombre de Reynolds.

Mesure du débit d'un fluide compressible.

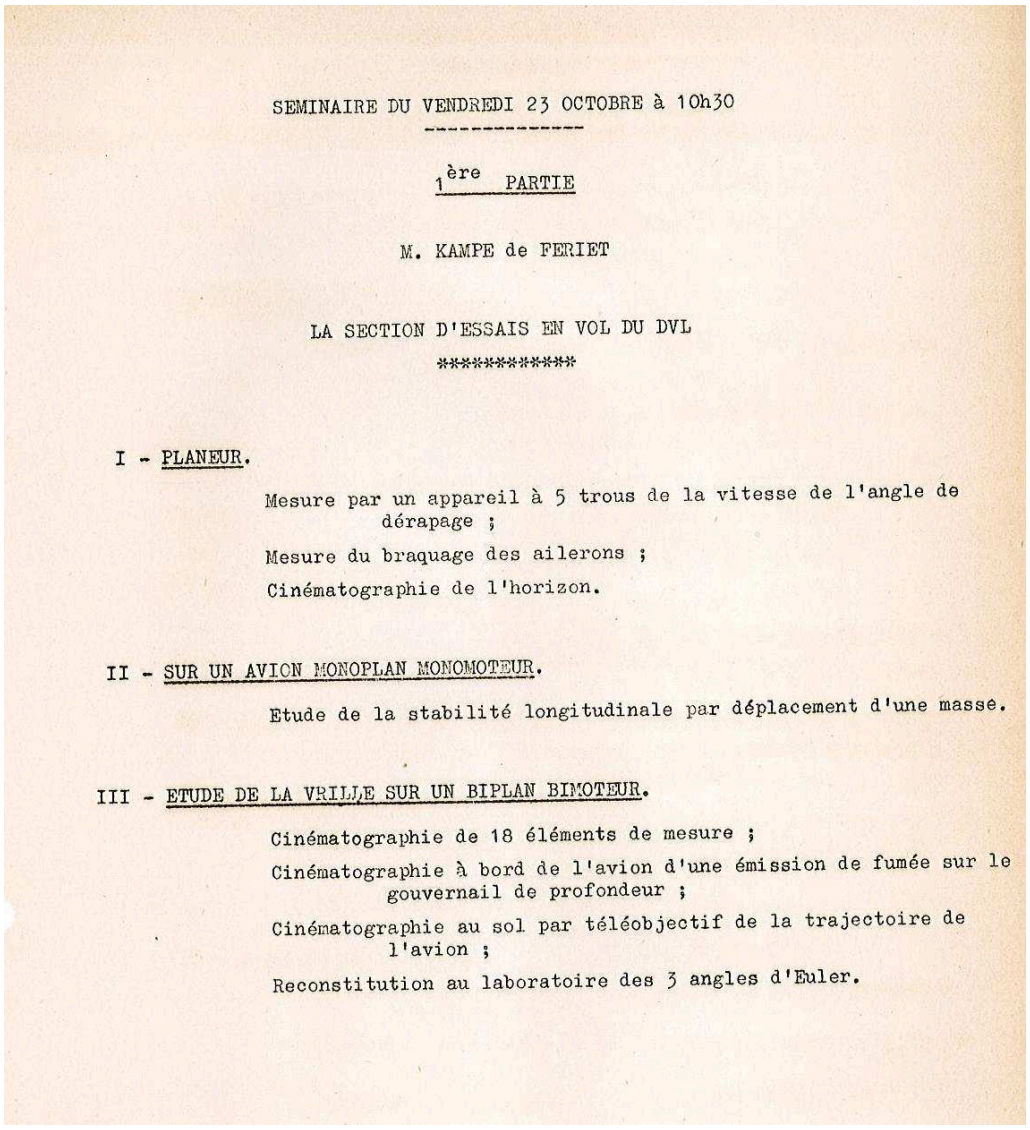
Calcul de la vitesse du son dans un tuyau déformable; relation entre les variations élémentaires de vitesse et de pression.- Fermeture d'une vanne: calcul de la compression (coup de bélier) dans un tuyau court, dans un tuyau long; réflexion de l'onde de pression sur le réservoir et sur la vanne.

Ecoulement d'un fluide compressible dans un tuyau; rapport de pressions critique; grandeurs caractéristiques au col du tuyau. Calcul du diamètre du col et du diamètre de sortie.

Résistance à l'avancement des obus : paramètre de similitude principal.

Résistance à l'avancement des navires : paramètre de similitude principal.

FIGURE D.5 – Programme de l'examen de mécanique des fluides de l'IDN, 1936



SEMINAIRE DU VENDREDI 23 OCTOBRE à 10h30

1ère PARTIE

M. KAMPE de FERIET

LA SECTION D'ESSAIS EN VOL DU DVL

****

I - PLANEUR.

Mesure par un appareil à 5 trous de la vitesse de l'angle de dérapage ;

Mesure du braquage des ailerons ;

Cinématographie de l'horizon.

II - SUR UN AVION MONOPLAN MONOMOTEUR.

Etude de la stabilité longitudinale par déplacement d'une masse.

III - ETUDE DE LA VRILLE SUR UN BIPLAN BIMOTEUR.

Cinématographie de 18 éléments de mesure ;

Cinématographie à bord de l'avion d'une émission de fumée sur le gouvernail de profondeur ;

Cinématographie au sol par téléobjectif de la trajectoire de l'avion ;

Reconstitution au laboratoire des 3 angles d'Euler.

FIGURE D.6 – Séminaire du 23 octobre 1936, Kampé de Fériet et Martinot-Lagarde

SEMINAIRE DU VENDREDI 23 OCTOBRE 1936

1ère partie à 10h30 : exposé par M. KAMPE de FERIET.

2ème partie :

QUELQUES REMARQUES

SUR CINQ LABORATOIRES AERODYNAMIQUES ALLEMANDS

par M. MARTINOT-LAGARDE

****

Deutsche Versuchanstalt für Luftfahrt Berlin-Adlershof (DVL)
Aerodynamische Versuchanstalt Göttingen (AVAG)
Technische Hochschule Aachen
" " Berlin Charlottenburg
Lufttechnische Akademie Berlin-Gatow.

1.- Souffleries aérodynamiques horizontales
La Soufflerie à surpression de Göttingen
La transmission de puissance par huile de Göttingen.

2.- Balances aérodynamiques ;
les balances à 7 composantes ;
la balance à support louvoyant de Göttingen.

3.- Appareillage divers : les essais d'hélice (avec moteur AVAG) ;
les manomètres (Betz et Prandtl).

4.- Expériences de visualisation
La pipe automatique Lippisch ; les ultracinémas (à objectif multiples, à objectif unique) ; le cinéma à longue distance focale.

5.- Expériences aux vitesses supersoniques (Gatow, Göttingen, Aachen).

6.- Expériences relatives à la vrille :
dans l'air ; dans l'eau.

Lille, le 22 Octobre 1936.

A. MARTINOT-LAGARDE

FIGURE D.7 – Séminaire du 23 octobre 1936, Kampé de Fériet et Martinot-Lagarde

SEMINAIRE DU MARDI 2 DECEMBRE 1936

******

DEBUT à 10 h 30

******

RECHERCHES DE CLARK , B. MILLIKAN SUR L'INFLUENCE DE LA TURBULENCE SUR LE C_z MAXIMUM

***

I - LA TURBULENCE de la Soufflerie de PASADENA est modifiée par un grillage à fils verticaux; résultats:

Tunnel sans grillage	R_c	340.000
Grillage à 48 "	R_c	180.000
Grillage à 20 " 5	R_c	140.000
Grillage à 10 "	R_c	100.000

R_c est défini par la condition $C_x = 0,3$ pour une sphère.

II - TROIS AILES étudiées N.A.C.A. 2412 - CLARK Y 18 - U.S.N.P.S. 6 chacune sans et avec un volet zapp à 45°

1°- A turbulence constante

a) dans 3 cas (N.A.C.A. 2412 avec ou sans volet, CLARK Y 18 avec volet) il y a augmentation du C_z maximum avec R

b) Pour l'aile CLARK Y I8 sans volet, le résultat précédent demeure lorsque la turbulence est forte; à très faible turbulence il y a légère diminution de C_z quand R augmente.

c) Pour l'aile U.S.N.P.S. 6 avec volet, C_z est constant à forte turbulence et diminue à faible turbulence.

d) Pour l'aile U.S.N.P.S. 6 sans volet, le C_z maximum est presque constant mais passe néanmoins par un léger maximum.

Exemples numériques:

R_c = 340.000 faible turbulence.

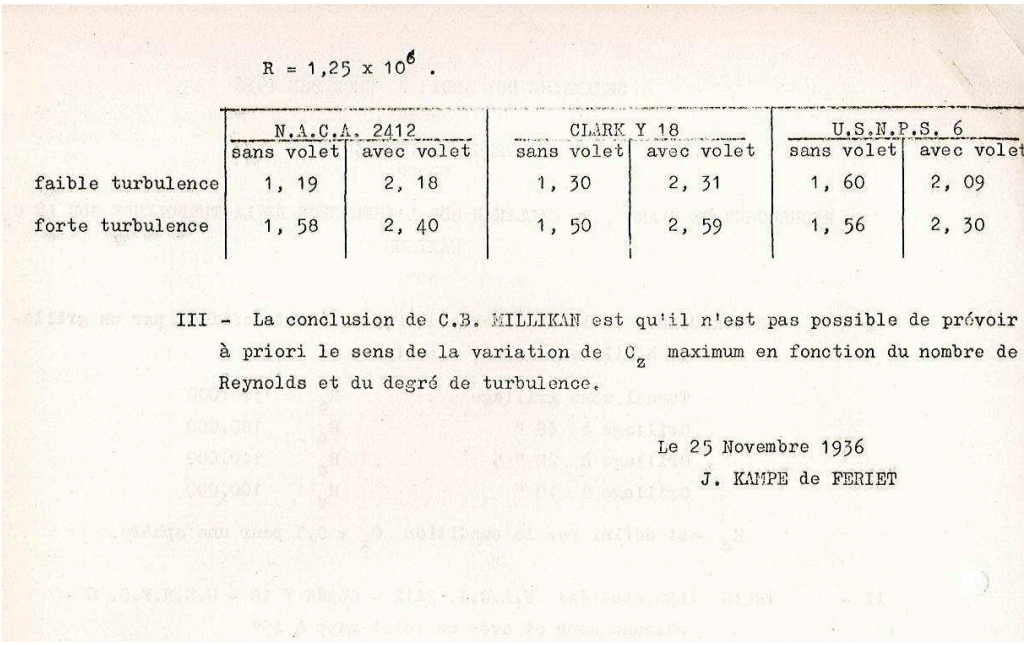
	N.A.C.A. 2412		CLARK Y 18		U.S.N.P.S. 6	
	sans volet	avec volet	sans volet	avec volet	sans volet	avec volet
R = 0,5	1, 08		1, 35	2, 25		
R = 0,75		2, 05			1, 60	2, 17
R = 1,25				2, 31		
R = 1,5	1, 20	2, 20	1, 25		1, 60	2,09

2°- A nombre de Reynolds constant.

Dans 5 cas il y a augmentation du C_z maximum avec la turbulence; seule pour l'aile U.S.N.P.S. 6 sans volet la variation d'ailleurs très faible, est en sens inverse.

Exemples numériques:

FIGURE D.8 – Séminaire du 2 décembre 1936, Kampé de Fériet



$R = 1{,}25 \times 10^6$.

	N.A.C.A. 2412		CLARK Y 18		U.S.N.P.S. 6	
	sans volet	avec volet	sans volet	avec volet	sans volet	avec volet
faible turbulence	1, 19	2, 18	1, 30	2, 31	1, 60	2, 09
forte turbulence	1, 58	2, 40	1, 50	2, 59	1, 56	2, 30

III - La conclusion de C.B. MILLIKAN est qu'il n'est pas possible de prévoir à priori le sens de la variation de C_z maximum en fonction du nombre de Reynolds et du degré de turbulence.

Le 25 Novembre 1936
J. KAMPE de FERIET

FIGURE D.9 – Séminaire du 2 décembre 1936, Kampé de Fériet

SEMINAIRE DU MARDI 15 DECEMBRE 1936
(Exceptionnellement à 11 heures)

PROTECTION METEREOLOGIQUE

1°- Introduction Nécessité d'une connaissance approfondie de l'atmosphère
Caractère synoptique des observations .

2°- Réseau d'observation

a) Observations au sol
Temps présent - Nébulosité
Nuages bas - hauteur - quantité
Vent : vitesse - direction
temps passé
Pression en m b s - Tendance et valeur
Température + maximum + minimum
Humidité - hauteur d'eau
Etat du sol

b) Sondage en altitude
Vent : 1 théodolite - 2 théodolites
repérage par le son - radiosonde + radiogonio
Pression , Humidité , Température : avion radio

3°- Réseau de transmission

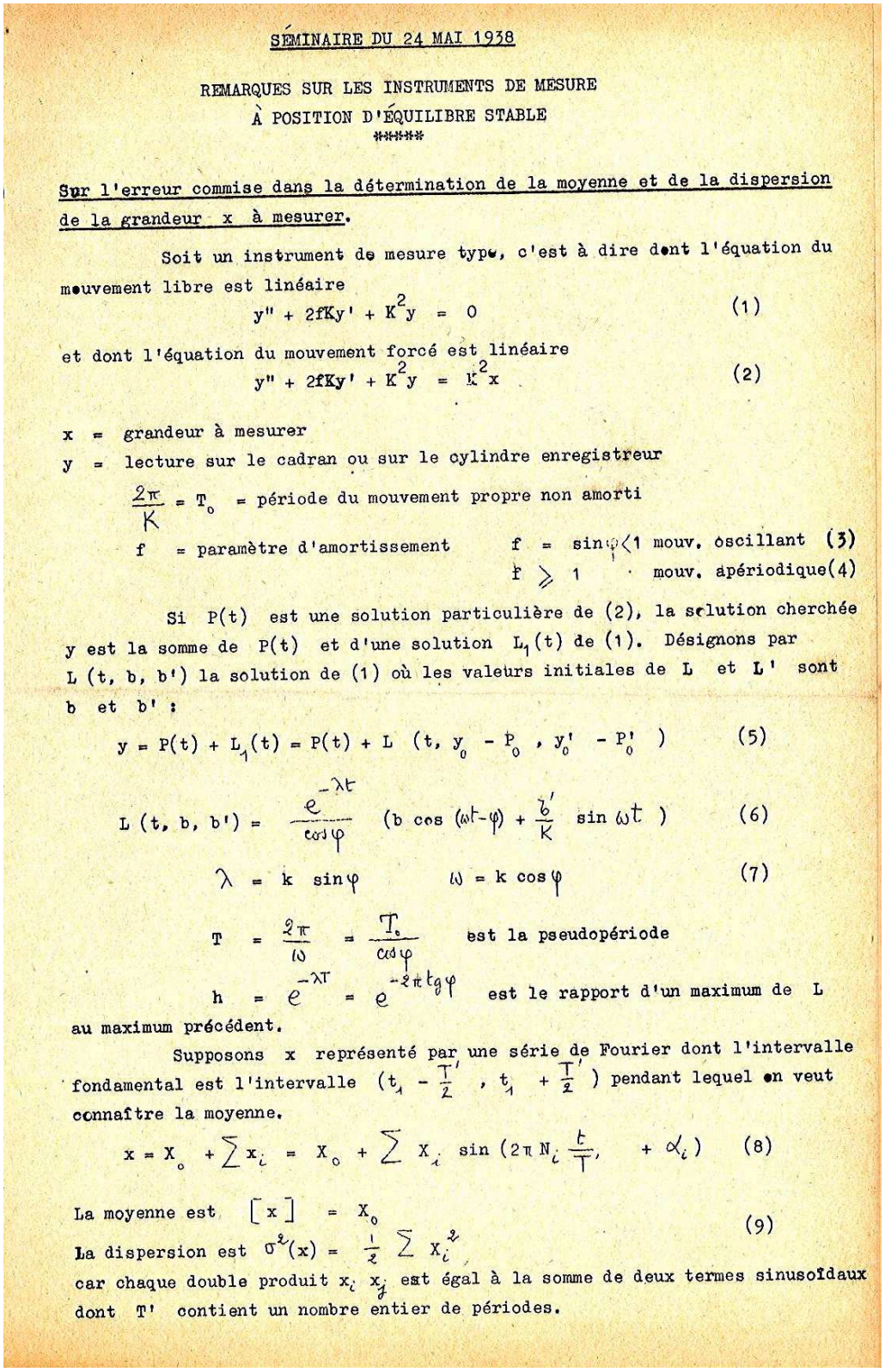
a) Tendance actuelle : remplacement de la T S F par le fil
L'usage de la T S F .

b) Organisation synoptique :
Emisphère Nord divisé en 5 régions
Role de la France (Tour Effel)
Toutes onservations reçues et réémises en 90 minutes
Prévision générale
Carte de nébulosité et de pression

c) Organisation régionale :
Nécessité : besion de l'aéronautique
Même organisation qu'à l'échelle synoptique - augmentation de l'efficacité de la protection par la multiplication des stations auxillaires (Gendarmes, centrales Instituts). Prévis - affichage - liaison en vol .

Jean SAUVEGRAIN

FIGURE D.10 – Séminaire du 15 décembre 1936, Sauvegrain



SÉMINAIRE DU 24 MAI 1938

REMARQUES SUR LES INSTRUMENTS DE MESURE
À POSITION D'ÉQUILIBRE STABLE
*****

Sur l'erreur commise dans la détermination de la moyenne et de la dispersion de la grandeur x à mesurer.

Soit un instrument de mesure type, c'est à dire dont l'équation du mouvement libre est linéaire

$$y'' + 2fKy' + K^2 y = 0 \qquad (1)$$

et dont l'équation du mouvement forcé est linéaire

$$y'' + 2fKy' + K^2 y = K^2 x \qquad (2)$$

x = grandeur à mesurer
y = lecture sur le cadran ou sur le cylindre enregistreur

$\frac{2\pi}{K} = T_0$ = période du mouvement propre non amorti

f = paramètre d'amortissement $f = \sin\varphi < 1$ mouv. oscillant (3)
$f \geqslant 1$ mouv. apériodique (4)

Si P(t) est une solution particulière de (2), la solution cherchée y est la somme de P(t) et d'une solution $L_1(t)$ de (1). Désignons par L (t, b, b') la solution de (1) où les valeurs initiales de L et L' sont b et b' :

$$y = P(t) + L_1(t) = P(t) + L\ (t,\ y_0 - P_0\ ,\ y_0' - P_0'\ ) \qquad (5)$$

$$L\ (t,\ b,\ b') = \frac{e^{-\lambda t}}{\cos\varphi}\ (b \cos(\omega t - \varphi) + \frac{b'}{K} \sin \omega t\ ) \qquad (6)$$

$$\lambda = k \sin\varphi \qquad \omega = k \cos\varphi \qquad (7)$$

$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{T_0}{\cos\varphi}$ est la pseudopériode

$h = e^{-\lambda T} = e^{-2\pi \operatorname{tg}\varphi}$ est le rapport d'un maximum de L au maximum précédent.

Supposons x représenté par une série de Fourier dont l'intervalle fondamental est l'intervalle $(t_1 - \frac{T'}{2}\ ,\ t_1 + \frac{T'}{2}\ )$ pendant lequel on veut connaître la moyenne.

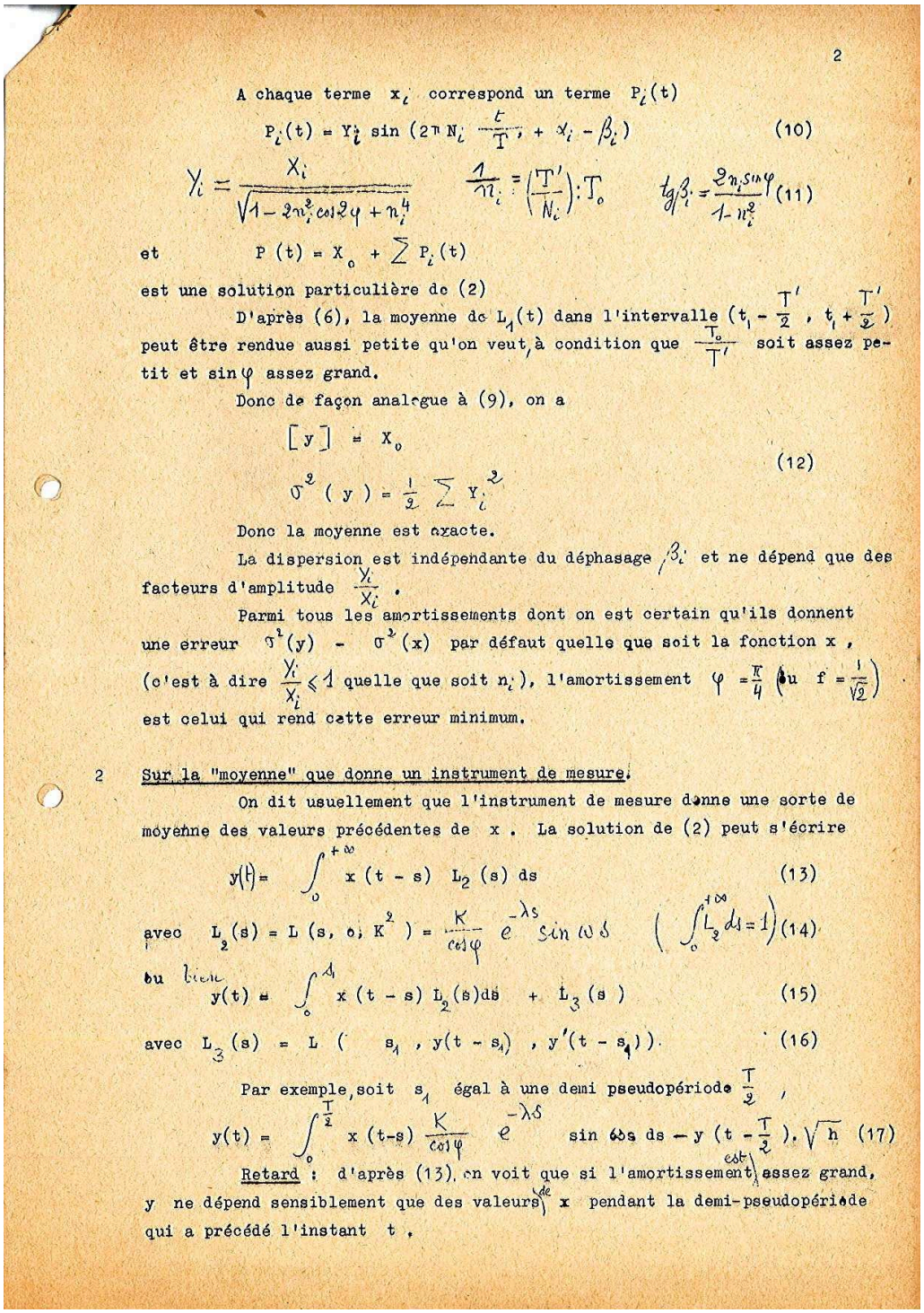
$$x = X_0 + \sum x_i = X_0 + \sum X_i \sin\ (2\pi N_i \frac{t}{T'} + \alpha_i\ ) \qquad (8)$$

La moyenne est $[x] = X_0$ (9)

La dispersion est $\sigma^2(x) = \frac{1}{2} \sum X_i^2$

car chaque double produit $x_i\ x_j$ est égal à la somme de deux termes sinusoïdaux dont T' contient un nombre entier de périodes.

FIGURE D.11 – Séminaire du 24 mai 1938, Martinot-Lagarde



2

A chaque terme x_i correspond un terme $P_i(t)$

$$P_i(t) = Y_i \sin\left(2\pi N_i \frac{t}{T} + \alpha_i - \beta_i\right) \qquad (10)$$

$$Y_i = \frac{X_i}{\sqrt{1 - 2n_i^2 \cos 2\varphi + n_i^4}} \qquad \frac{1}{n_i} = \left(\frac{T'}{N_i}\right) : T_0 \qquad \operatorname{tg}\beta_i = \frac{2n_i \sin\varphi}{1 - n_i^2} \qquad (11)$$

et $P(t) = X_0 + \sum P_i(t)$

est une solution particulière de (2)

D'après (6), la moyenne de $L_1(t)$ dans l'intervalle $\left(t_1 - \frac{T'}{2}, t_1 + \frac{T'}{2}\right)$ peut être rendue aussi petite qu'on veut, à condition que $\frac{T_0}{T'}$ soit assez petit et $\sin\varphi$ assez grand.

Donc de façon analogue à (9), on a

$$[y] = X_0 \qquad (12)$$

$$\sigma^2(y) = \frac{1}{2} \sum Y_i^2$$

Donc la moyenne est exacte.

La dispersion est indépendante du déphasage β_i et ne dépend que des facteurs d'amplitude $\frac{Y_i}{X_i}$.

Parmi tous les amortissements dont on est certain qu'ils donnent une erreur $\sigma^2(y) - \sigma^2(x)$ par défaut quelle que soit la fonction x, (c'est à dire $\frac{Y_i}{X_i} \leqslant 1$ quelle que soit n_i), l'amortissement $\varphi = \frac{\pi}{4}$ (ou $f = \frac{1}{\sqrt{2}}$) est celui qui rend cette erreur minimum.

2 Sur la "moyenne" que donne un instrument de mesure.

On dit usuellement que l'instrument de mesure donne une sorte de moyenne des valeurs précédentes de x. La solution de (2) peut s'écrire

$$y(t) = \int_0^{+\infty} x(t-s)\, L_2(s)\, ds \qquad (13)$$

avec $L_2(s) = L(s, o; K^2) = \frac{K}{\cos\varphi} e^{-\lambda s} \sin\omega s$ $\left(\int_0^{+\infty} L_2\, ds = 1\right)$ (14)

ou bien

$$y(t) = \int_0^{A} x(t-s)\, L_2(s)\, ds + L_3(s) \qquad (15)$$

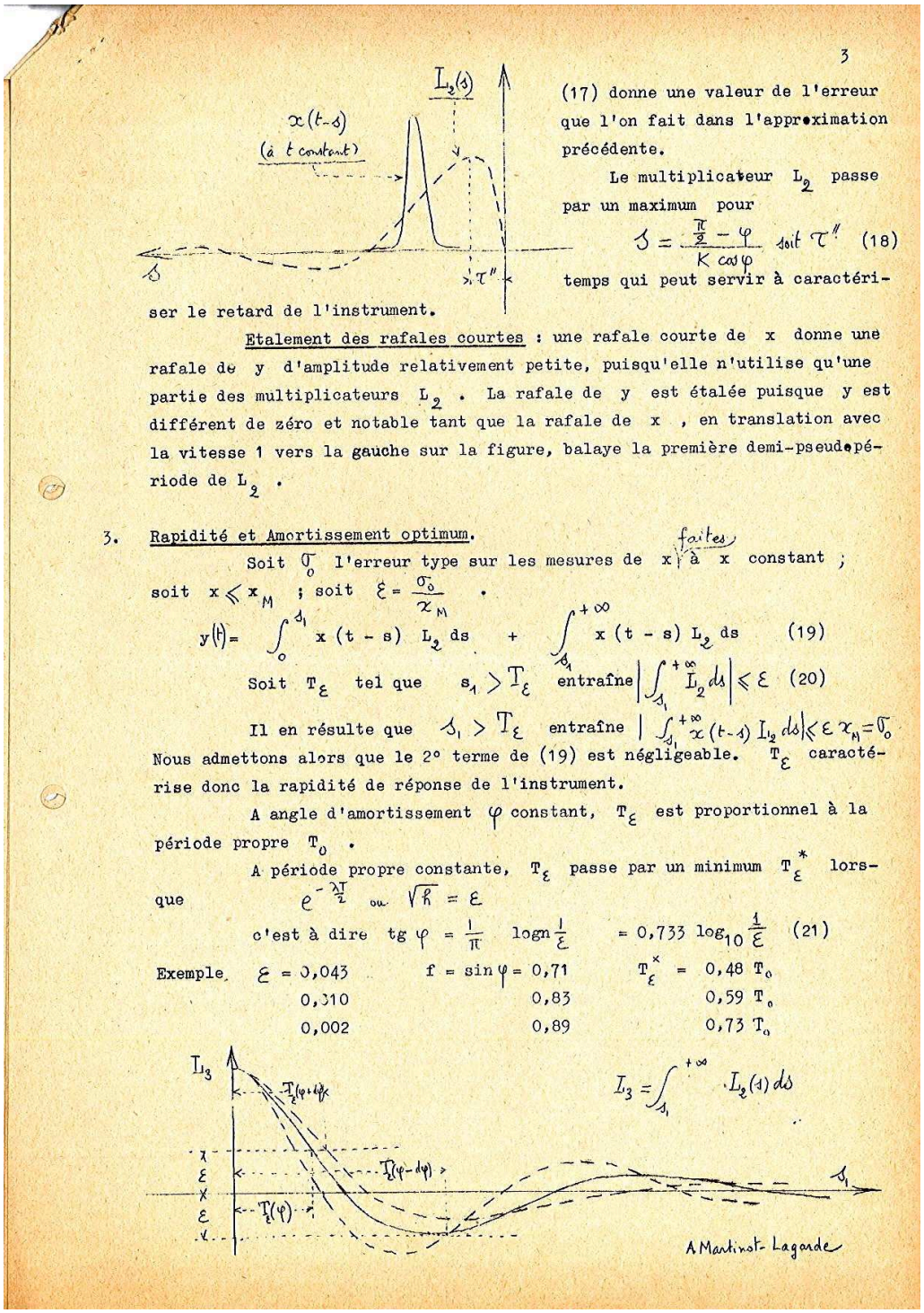
avec $L_3(s) = L(s_1, y(t-s_1), y'(t-s_1))$. (16)

Par exemple, soit s_1 égal à une demi pseudopériode $\frac{T}{2}$,

$$y(t) = \int_0^{\frac{T}{2}} x(t-s) \frac{K}{\cos\varphi} e^{-\lambda\delta} \sin\omega s\, ds - y\left(t - \frac{T}{2}\right) \sqrt{h} \qquad (17)$$

Retard : d'après (13), on voit que si l'amortissement est assez grand, y ne dépend sensiblement que des valeurs de x pendant la demi-pseudopériode qui a précédé l'instant t.

FIGURE D.12 – Séminaire du 24 mai 1938, Martinot-Lagarde



3

(17) donne une valeur de l'erreur que l'on fait dans l'approximation précédente.

Le multiplicateur L_2 passe par un maximum pour

$$s = \frac{\frac{\pi}{2} - \varphi}{K \cos\varphi} \text{ soit } \tau'' \quad (18)$$

temps qui peut servir à caractériser le retard de l'instrument.

Etalement des rafales courtes : une rafale courte de x donne une rafale de y d'amplitude relativement petite, puisqu'elle n'utilise qu'une partie des multiplicateurs L_2. La rafale de y est étalée puisque y est différent de zéro et notable tant que la rafale de x, en translation avec la vitesse 1 vers la gauche sur la figure, balaye la première demi-pseudo-période de L_2.

3. Rapidité et Amortissement optimum.

Soit σ_0 l'erreur type sur les mesures de x faites à x constant ; soit $x \leqslant x_M$; soit $\varepsilon = \frac{\sigma_0}{x_M}$.

$$y(t) = \int_0^{s_1} x(t-s)\, L_2\, ds + \int_{s_1}^{+\infty} x(t-s)\, L_2\, ds \quad (19)$$

Soit T_ε tel que $s_1 > T_\varepsilon$ entraîne $\left| \int_{s_1}^{+\infty} L_2\, ds \right| \leqslant \varepsilon$ (20)

Il en résulte que $s_1 > T_\varepsilon$ entraîne $\left| \int_{s_1}^{+\infty} x(t-s)\, L_2\, ds \right| \leqslant \varepsilon x_M = \sigma_0$

Nous admettons alors que le 2° terme de (19) est négligeable. T_ε caractérise donc la rapidité de réponse de l'instrument.

A angle d'amortissement φ constant, T_ε est proportionnel à la période propre T_0.

A période propre constante, T_ε passe par un minimum T_ε^* lorsque $e^{-\frac{\lambda T}{2}}$ ou $\sqrt{k} = \varepsilon$

c'est à dire $\operatorname{tg}\varphi = \frac{1}{\pi} \log n \frac{1}{\varepsilon} = 0{,}733 \log_{10} \frac{1}{\varepsilon}$ (21)

Exemple	ε =	$f = \sin\varphi$ =	T_ε^* =
	0,043	0,71	0,48 T_0
	0,010	0,83	0,59 T_0
	0,002	0,89	0,73 T_0

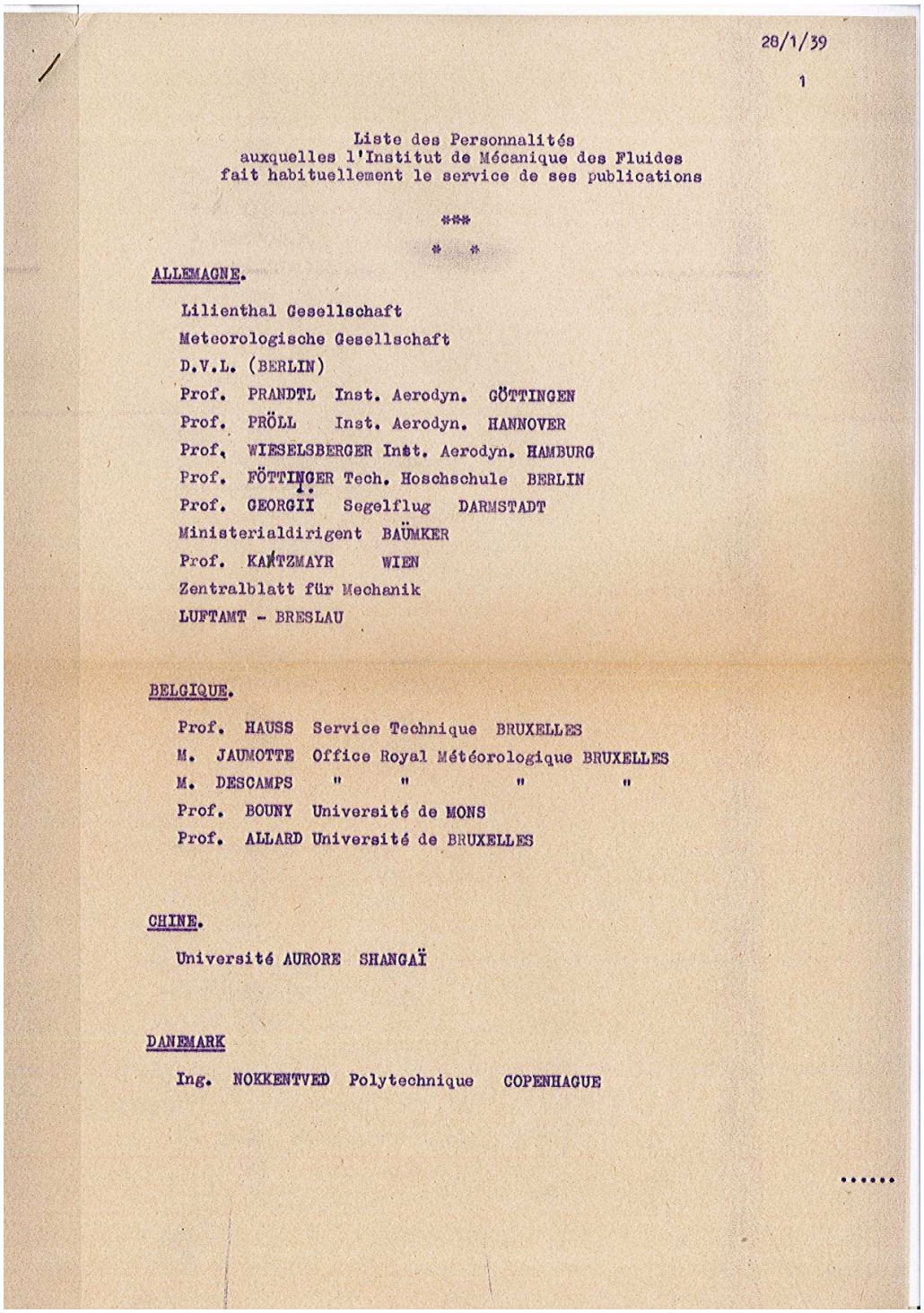
A Martinot-Lagarde

FIGURE D.13 – Séminaire du 24 mai 1938, Martinot-Lagarde

Annexe E

Liste des destinataires habituels des publications de l'IMFL

Ce document (janvier 1939) provient des Archives de l'ONERA centre de Lille. Il s'agit d'une liste (non exhaustive) des personnalités et des universités auxquelles l'institut envoyait habituellement ses publications pendant l'entre-deux-guerres.



28/1/39

1

Liste des Personnalités
auxquelles l'Institut de Mécanique des Fluides
fait habituellement le service de ses publications

***

* *

ALLEMAGNE.

Lilienthal Gesellschaft
Meteorologische Gesellschaft
D.V.L. (BERLIN)
Prof. PRANDTL Inst. Aerodyn. GÖTTINGEN
Prof. PRÖLL Inst. Aerodyn. HANNOVER
Prof. WIESELSBERGER Inst. Aerodyn. HAMBURG
Prof. FÖTTINGER Tech. Hoschschule BERLIN
Prof. GEORGII Segelflug DARMSTADT
Ministerialdirigent BAÜMKER
Prof. KAMTZMAYR WIEN
Zentralblatt für Mechanik
LUFTAMT - BRESLAU

BELGIQUE.

Prof. HAUSS Service Technique BRUXELLES
M. JAUMOTTE Office Royal Météorologique BRUXELLES
M. DESCAMPS " " " "
Prof. BOUNY Université de MONS
Prof. ALLARD Université de BRUXELLES

CHINE.

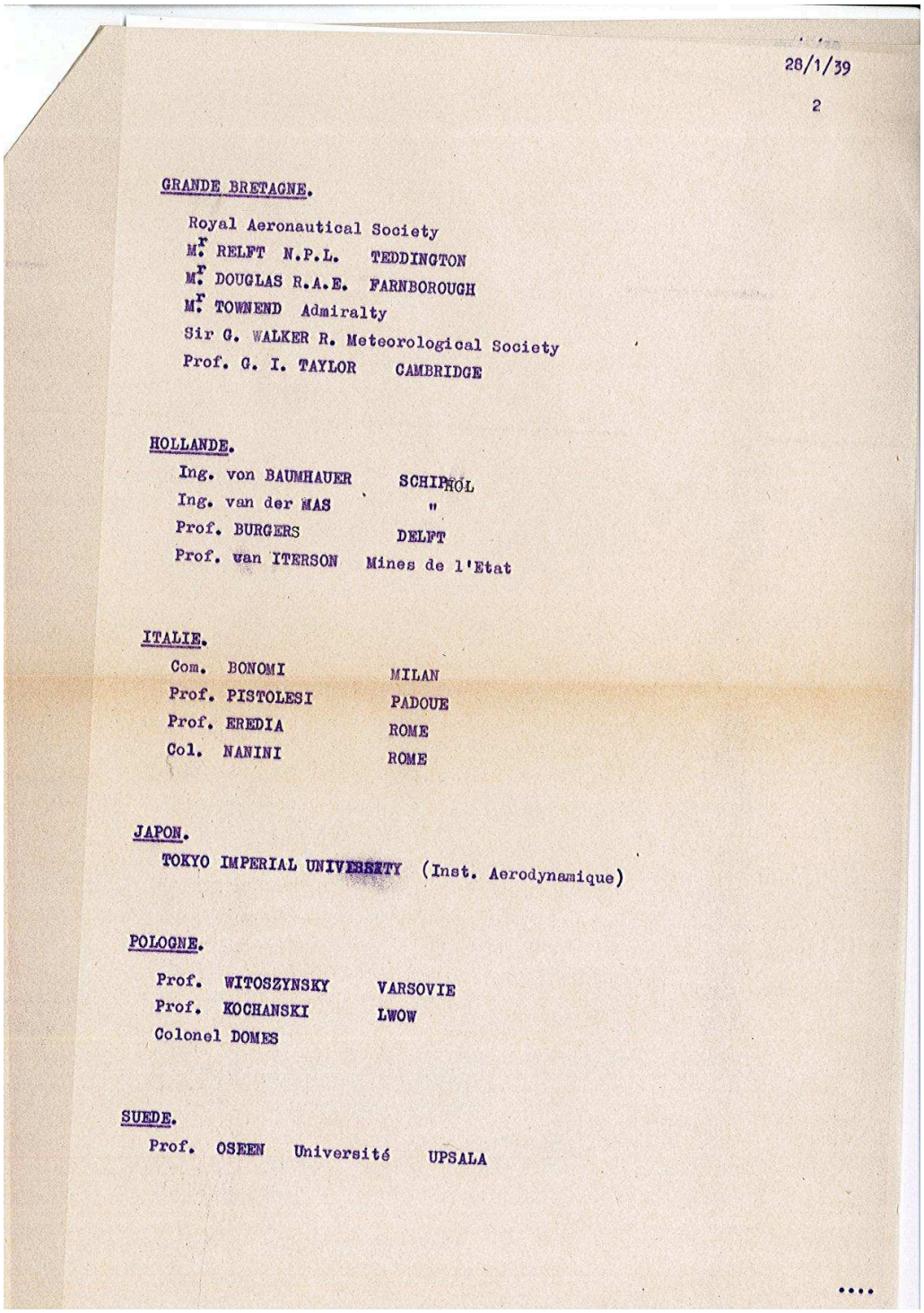
Université AURORE SHANGAÏ

DANEMARK

Ing. NOKKENTVED Polytechnique COPENHAGUE

.....

FIGURE E.1 – Liste des destinataires habituels des publications de l'IMFL, p. 1



28/1/39

2

GRANDE BRETAGNE.

Royal Aeronautical Society
M.r RELFT N.P.L. TEDDINGTON
M.r DOUGLAS R.A.E. FARNBOROUGH
M.r TOWNEND Admiralty
Sir G. WALKER R. Meteorological Society
Prof. G. I. TAYLOR CAMBRIDGE

HOLLANDE.

Ing. von BAUMHAUER SCHIPHOL
Ing. van der MAS "
Prof. BURGERS DELFT
Prof. van ITERSON Mines de l'Etat

ITALIE.

Com. BONOMI MILAN
Prof. PISTOLESI PADOUE
Prof. EREDIA ROME
Col. NANINI ROME

JAPON.

TOKYO IMPERIAL UNIVERSITY (Inst. Aerodynamique)

POLOGNE.

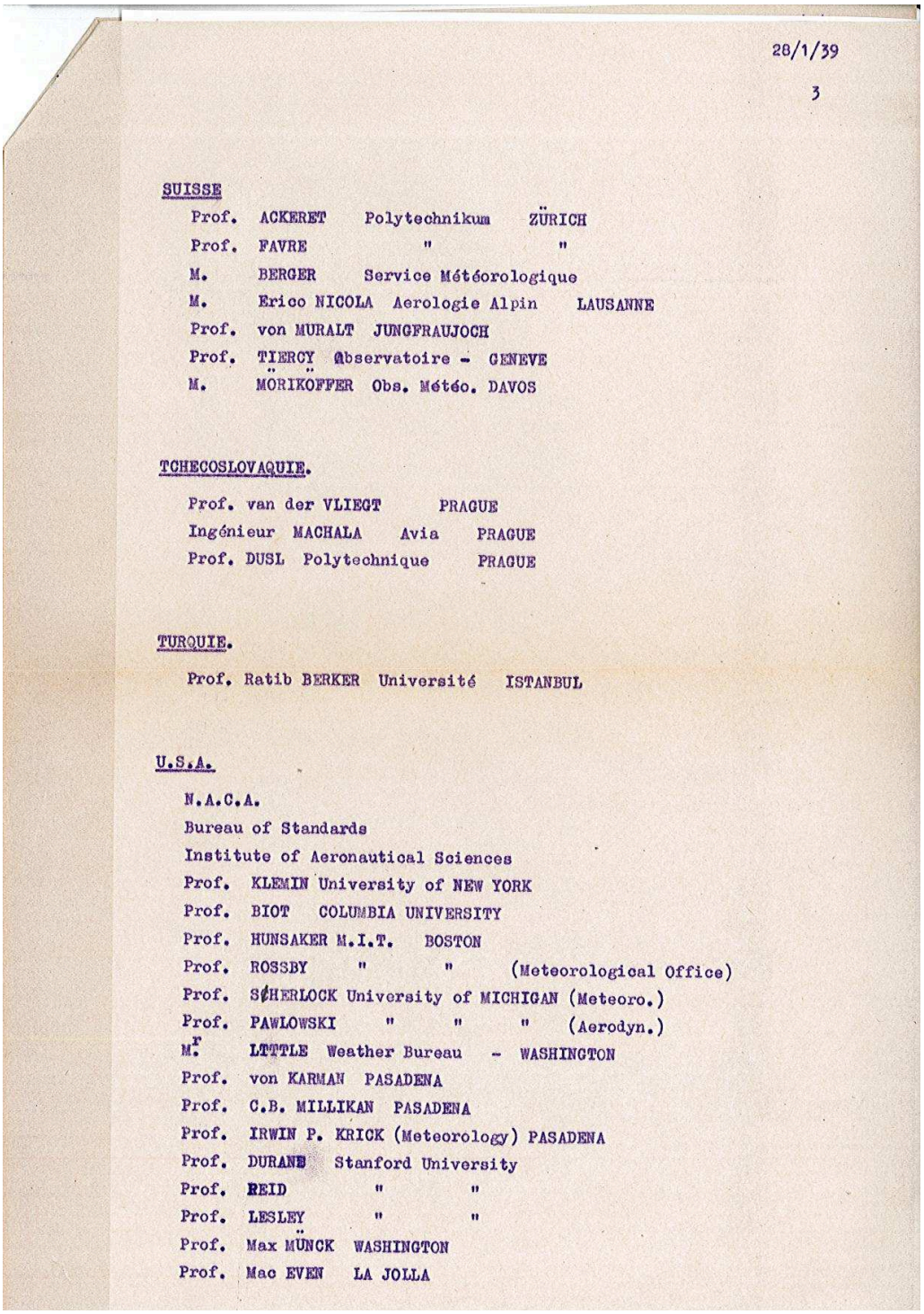
Prof. WITOSZYNSKY VARSOVIE
Prof. KOCHANSKI LWOW
Colonel DOMES

SUEDE.

Prof. OSEEN Université UPSALA

....

FIGURE E.2 – Liste des destinataires habituels des publications de l'IMFL, p. 2



28/1/39

3

SUISSE

Prof. ACKERET Polytechnikum ZÜRICH
Prof. FAVRE " "
M. BERGER Service Météorologique
M. Erico NICOLA Aerologie Alpin LAUSANNE
Prof. von MURALT JUNGFRAUJOCH
Prof. TIERCY Observatoire - GENEVE
M. MORIKOFFER Obs. Météo. DAVOS

TCHECOSLOVAQUIE.

Prof. van der VLIEGT PRAGUE
Ingénieur MACHALA Avia PRAGUE
Prof. DUSL Polytechnique PRAGUE

TURQUIE.

Prof. Ratib BERKER Université ISTANBUL

U.S.A.

N.A.C.A.
Bureau of Standards
Institute of Aeronautical Sciences
Prof. KLEMIN University of NEW YORK
Prof. BIOT COLUMBIA UNIVERSITY
Prof. HUNSAKER M.I.T. BOSTON
Prof. ROSSBY " " (Meteorological Office)
Prof. SHERLOCK University of MICHIGAN (Meteoro.)
Prof. PAWLOWSKI " " " (Aerodyn.)
M. LITTLE Weather Bureau - WASHINGTON
Prof. von KARMAN PASADENA
Prof. C.B. MILLIKAN PASADENA
Prof. IRWIN P. KRICK (Meteorology) PASADENA
Prof. DURAND Stanford University
Prof. REID " "
Prof. LESLEY " "
Prof. Max MUNCK WASHINGTON
Prof. Mac EVEN LA JOLLA

FIGURE E.3 – Liste des destinataires habituels des publications de l'IMFL, p. 3

Annexe F

Extrait du texte *Hasard et Probabilité* (1945)

Il s'agit d'un extrait tiré d'un brouillon de cet article provenant du fonds Kampé de Fériet des Archives de l'ONERA Lille.

Hasard et Probabilité
dans la
pensée scientifique contemporaine

par

J. KAMPÉ DE FÉRIET (1)

« Que ces probabilités sont utiles ! »

I. — L'exclamation de Louis de MONTALTE (2) à l'aimable Père de la Compagnie de Jésus, qui venait de lui montrer comment le probabilisme modifiait, jusque dans ses principes, la morale chrétienne, ne serait-elle pas encore plus justifiée, mes chers Collègues, en découvrant la transformation que la Physique moderne nous propose depuis quelques décades de faire subir à l'image du monde ?

Au réseau de *trajectoires prédéterminées pour toujours* par les calculs inexorables d'un mathématicien idéal, allons-nous substituer les contours mouvants et vaporeux d'un univers *en devenir*, où règne non seulement l'imprévu, mais encore *l'imprévisible* ?

Voici longtemps déjà que la notion de *probabilité* s'est introduite dans la science ; depuis cinquante ans elle a peu à peu forcé l'entrée de tous les domaines et tout envahi ; « après l'introduction de la Statistique en Physique, il s'est produit une véritable *occupation* de celle-ci par celle-là » (3). Mais, fait plus important encore, le mot probabilité n'a-t-il pas aujourd'hui un son nouveau ? Le *hasard*, postulé par les applications du Calcul abstrait des probabilités au monde de l'expérience, a-t-il le même sens pour le mécanisme déterministe qui a régné en maître de NEWTON à POINCARÉ et pour la Mécanique statistique que nous proposent les adeptes de la Physique quantique et de la Mécanique ondulatoire ?

(1) Communication faite à la séance du 20 avril 1945.

(2) 6e lettre escritte à un provincial par un de ses amis — Blaise PASCAL — *les Provinciales* — texte de 1656-57, page 81.

(3) P. LANGEVIN, dans les comptes-rendus de la VIIe semaine internationale de synthèse: *la Statistique, ses applications, les problèmes qu'elles soulèvent.* (Paris, Presses Universitaires, 1944), p. 242.

De la Physique du XIXe siècle, bâtie sur le modèle de la Mécanique céleste de LAPLACE où le présent permet de *calculer* le futur, à la Physique atomique contemporaine étudiant électrons, neutrons et photons à travers les *relations d'incertitude* d'HEISENBERG, quelle route parcourue par la pensée scientifique !

Oh ! que ces probabilités sont donc utiles !

II. — Le Calcul des probabilités, science abstraite qui présente le même degré de certitude que l'Arithmétique ou l'Analyse mathématique (sur l'une ou l'autre desquelles il est fondé selon que le nombre des événements possibles est fini ou infini) et ses multiples applications expérimentales, que l'on peut grouper sous le nom général de Statistique, occupent une place de tout premier plan dans la science contemporaine,

Le fait est trop évident pour qu'il soit besoin d'insister :
la Démographie (tables de survie, tables d'invalidité, taux de fécondité, barèmes multiples des compagnies d'assurance),
la Psychologie (liaison des caractères, corrélation des aptitudes, tests de tout genre),
la Biologie (hérédité mendélelenne, génétique de MORGAN, propagation des espèces),
l'Astronomie (statistique stellaire),
dans toutes les sciences, dans toutes les techniques, on utilise aujourd'hui les méthodes statistiques ; on n'établit plus un réseau de téléphone automatique sans avoir, au préalable, consulté des tables de probabilités fournissant les chiffres probables de communications, à chaque heure de la journée, pour un nombre donné d'abonnés.

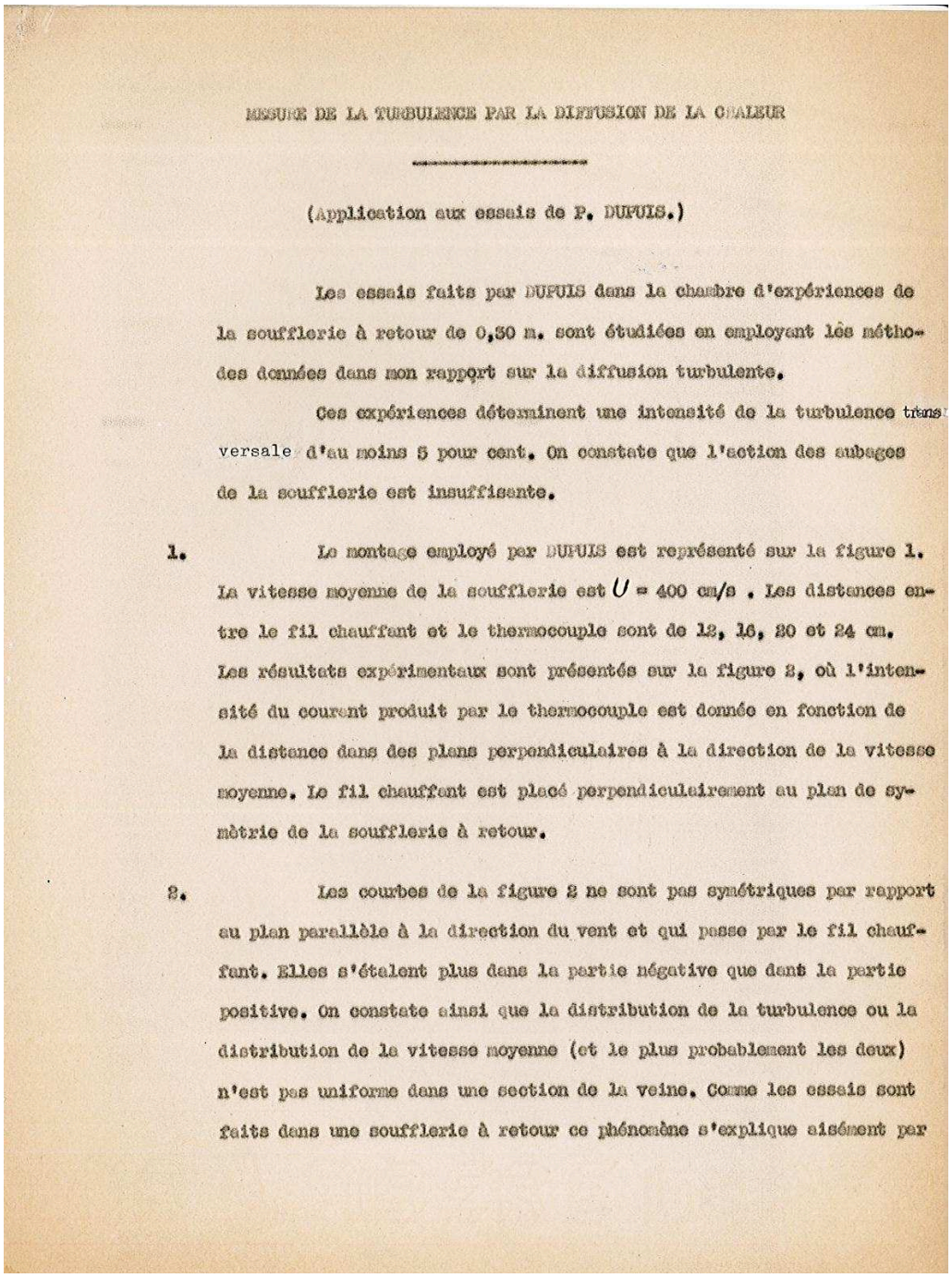
Le titre même de ma communication n'est-il pas une démonstration de l'envahissement progressif de la science par le Calcul des probabilités ? Les idées, dont je voudrais vous faire part, ne sont nullement en effet, en marge de mon activité professionnelle ; comme Professeur de Mécanique des Fluides, depuis une dizaine d'années, je me suis consacré à l'étude de ce que nous appelons « la Turbulence » ; or, il est évident, pour tous ceux qui ont abordé l'étude des écoulements turbulents, que la solution des problèmes posés, échappant complètement aux disciplines de la Mécanique des fluides classique, ressort aux méthodes de la Mécanique statistique ; c'est ainsi que j'ai été amené, peu à peu, à faire quelques-une des réflexions que je vous soumets aujourd'hui, mes chers Collègues.

III. — Le Calcul des probabilités a été créé au XVIIe siècle, pour répondre à des questions soulevées par les jeux de hasard ; c'est Antoine GOMBAUD, Chevalier de Méré, qui avait posé à PASCAL le problème de *la règle des partis*. Les premiers théorèmes du Calcul

Annexe G

Les travaux en clandestinité de N. Frenkiel à Toulouse

Dans cette annexe nous présenterons un des travaux effectués par Frenkiel pendant sa période de clandestinité à Toulouse. Ce texte, rédigé en janvier 1942, porte sur une étude de la mesure de la turbulence par la diffusion de la chaleur et il est conservé dans les Archives de l'ONERA Lille.



MESURE DE LA TURBULENCE PAR LA DIFFUSION DE LA CHALEUR

(Application aux essais de P. DUFUIS.)

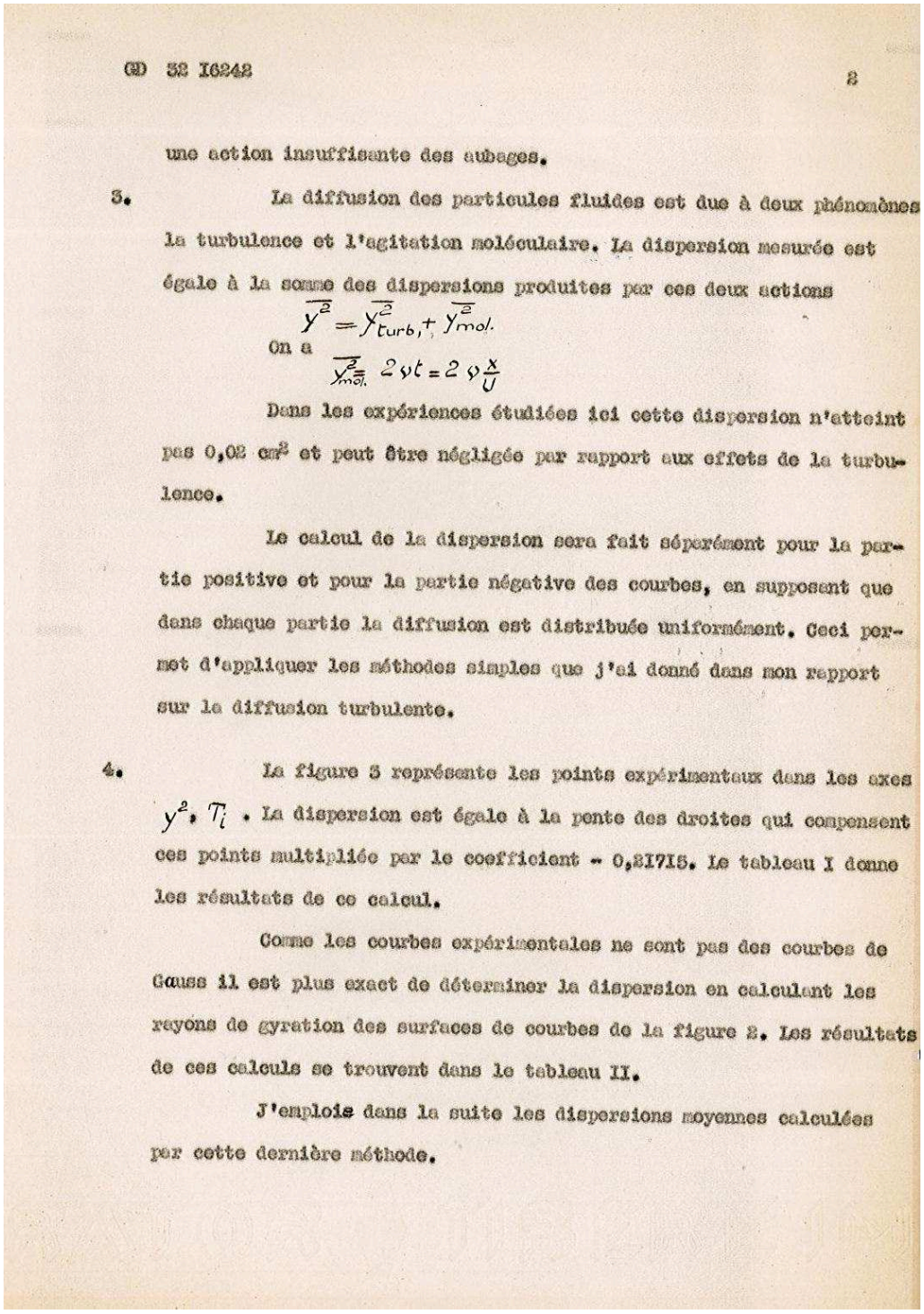
Les essais faits par DUFUIS dans la chambre d'expériences de la soufflerie à retour de 0,50 m. sont étudiées en employant lés méthodes données dans mon rapport sur la diffusion turbulente.

Ces expériences déterminent une intensité de la turbulence transversale d'au moins 5 pour cent. On constate que l'action des aubages de la soufflerie est insuffisante.

1. Le montage employé par DUFUIS est représenté sur la figure 1. La vitesse moyenne de la soufflerie est U = 400 cm/s . Les distances entre le fil chauffant et le thermocouple sont de 12, 16, 20 et 24 cm. Les résultats expérimentaux sont présentés sur la figure 2, où l'intensité du courant produit par le thermocouple est donnée en fonction de la distance dans des plans perpendiculaires à la direction de la vitesse moyenne. Le fil chauffant est placé perpendiculairement au plan de symètrie de la soufflerie à retour.

2. Les courbes de la figure 2 ne sont pas symétriques par rapport au plan parallèle à la direction du vent et qui passe par le fil chauffant. Elles s'étalent plus dans la partie négative que dans la partie positive. On constate ainsi que la distribution de la turbulence ou la distribution de la vitesse moyenne (et le plus probablement les deux) n'est pas uniforme dans une section de la veine. Comme les essais sont faits dans une soufflerie à retour ce phénomène s'explique aisément par

FIGURE G.1 – Les travaux en clandestinité de N. Frenkiel, p. 1



CD 32 I6242 2

une action insuffisante des aubages.

3. La diffusion des particules fluides est due à deux phénomènes la turbulence et l'agitation moléculaire. La dispersion mesurée est égale à la somme des dispersions produites par ces deux actions

$$\overline{y^2} = \overline{y^2}_{turb.} + \overline{y^2}_{mol.}$$

On a

$$\overline{y^2}_{mol.} = 2\nu t = 2\nu \frac{x}{U}$$

Dans les expériences étudiées ici cette dispersion n'atteint pas 0,02 cm² et peut être négligée par rapport aux effets de la turbulence.

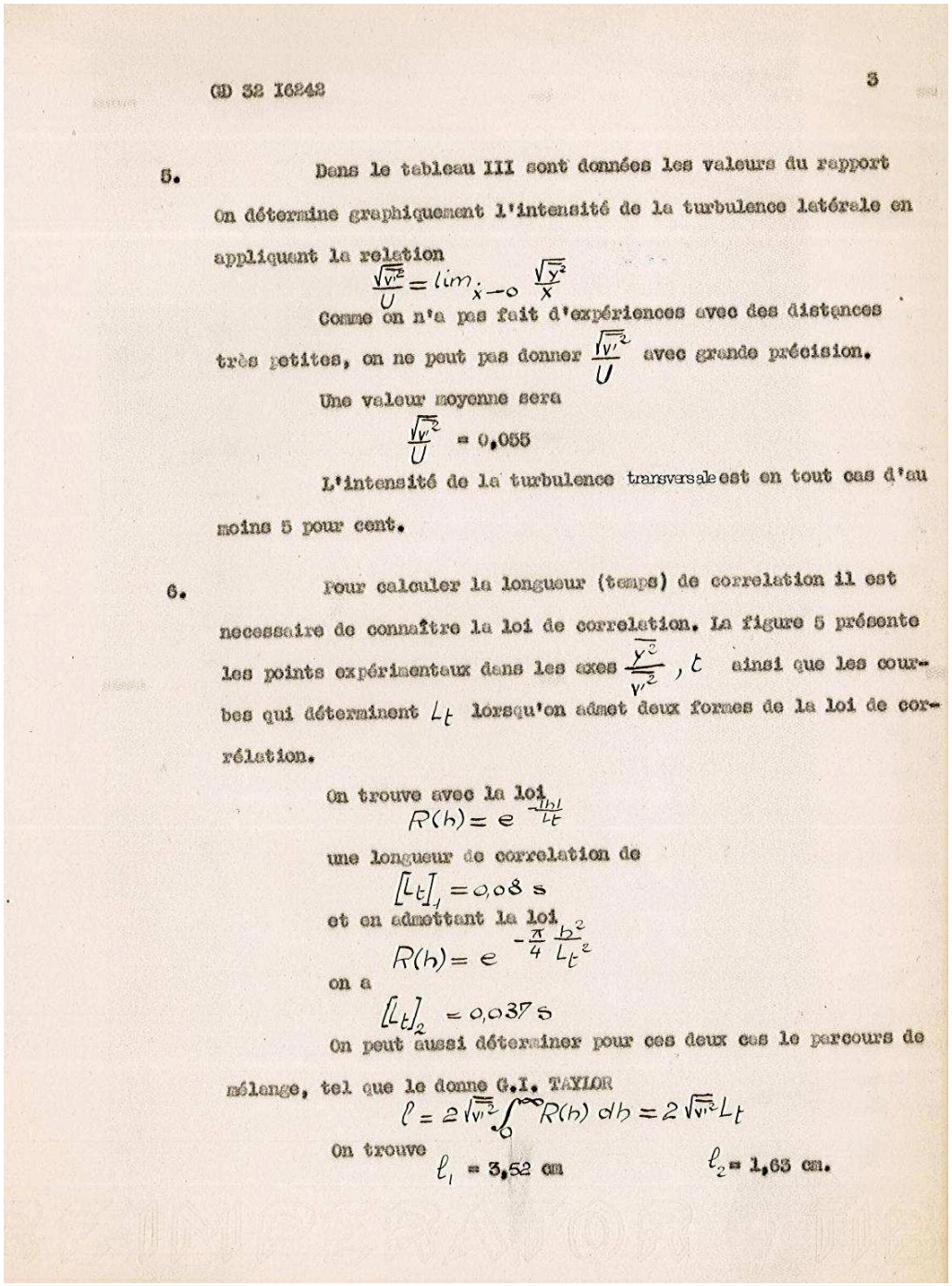
Le calcul de la dispersion sera fait séparément pour la partie positive et pour la partie négative des courbes, en supposant que dans chaque partie la diffusion est distribuée uniformément. Ceci permet d'appliquer les méthodes simples que j'ai donné dans mon rapport sur la diffusion turbulente.

4. La figure 3 représente les points expérimentaux dans les axes y^2, η_i . La dispersion est égale à la pente des droites qui compensent ces points multipliée par le coefficient - 0,28715. Le tableau I donne les résultats de ce calcul.

Comme les courbes expérimentales ne sont pas des courbes de Gauss il est plus exact de déterminer la dispersion en calculant les rayons de gyration des surfaces de courbes de la figure 2. Les résultats de ces calculs se trouvent dans le tableau II.

J'emploie dans la suite les dispersions moyennes calculées par cette dernière méthode.

FIGURE G.2 – Les travaux en clandestinité de N. Frenkiel, p. 2



GD 32 I6242 3

5. Dans le tableau III sont données les valeurs du rapport

On détermine graphiquement l'intensité de la turbulence latérale en appliquant la relation

$$\frac{\sqrt{\overline{v'^2}}}{U} = \lim_{x \to 0} \frac{\sqrt{\overline{y^2}}}{x}$$

Comme on n'a pas fait d'expériences avec des distances très petites, on ne peut pas donner $\frac{\sqrt{\overline{v'^2}}}{U}$ avec grande précision.

Une valeur moyenne sera

$$\frac{\sqrt{\overline{v'^2}}}{U} = 0{,}055$$

L'intensité de la turbulence transversale est en tout cas d'au moins 5 pour cent.

6. Pour calculer la longueur (temps) de corrélation il est nécessaire de connaître la loi de corrélation. La figure 5 présente les points expérimentaux dans les axes $\frac{\overline{y^2}}{\overline{v'^2}}, t$ ainsi que les courbes qui déterminent L_t lorsqu'on admet deux formes de la loi de corrélation.

On trouve avec la loi

$$R(h) = e^{-\frac{|h|}{L_t}}$$

une longueur de corrélation de

$$[L_t]_1 = 0{,}08 \text{ s}$$

et en admettant la loi

$$R(h) = e^{-\frac{\pi}{4}\frac{h^2}{L_t^2}}$$

on a

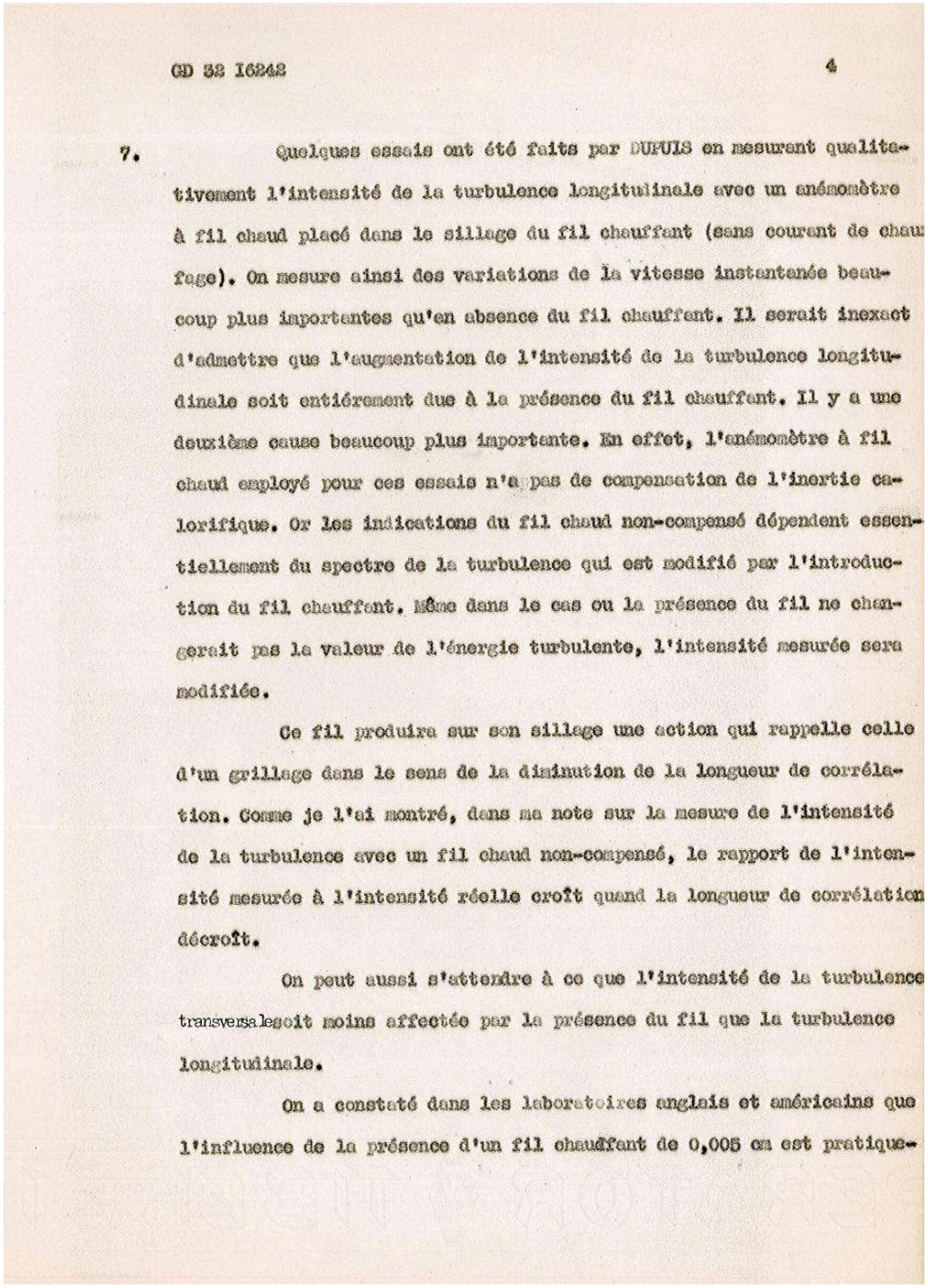
$$[L_t]_2 = 0{,}037 \text{ s}$$

On peut aussi déterminer pour ces deux cas le parcours de mélange, tel que le donne G.I. TAYLOR

$$\ell = 2\sqrt{\overline{v'^2}} \int_0^\infty R(h)\, dh = 2\sqrt{\overline{v'^2}} L_t$$

On trouve $\ell_1 = 3{,}52$ cm $\qquad \ell_2 = 1{,}63$ cm.

FIGURE G.3 – Les travaux en clandestinité de N. Frenkiel, p. 3



CD 32 16242 4

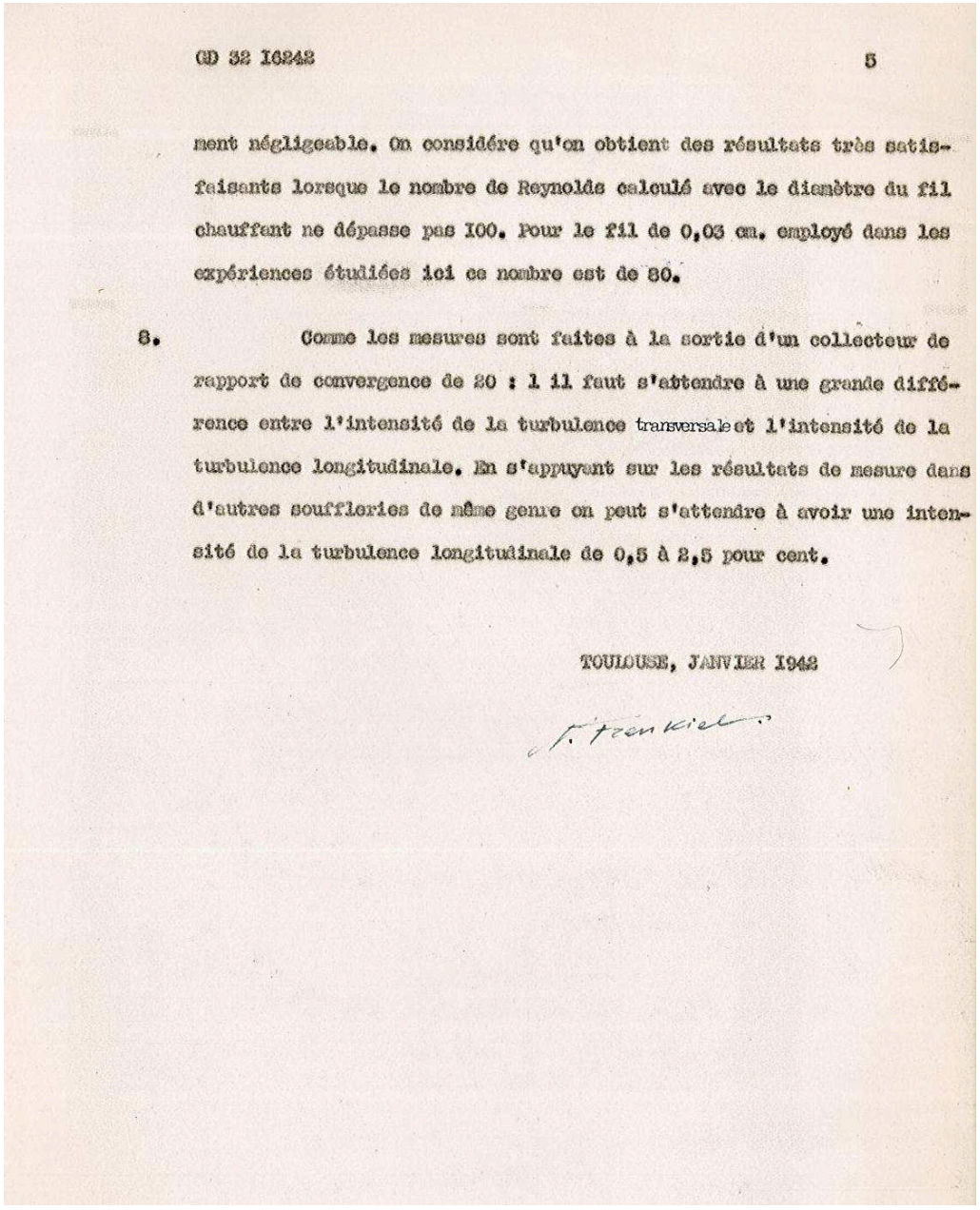
7. Quelques essais ont été faits par DUFUIS en mesurant qualitativement l'intensité de la turbulence longitudinale avec un anémomètre à fil chaud placé dans le sillage du fil chauffant (sans courant de chauffage). On mesure ainsi des variations de la vitesse instantanée beaucoup plus importantes qu'en absence du fil chauffant. Il serait inexact d'admettre que l'augmentation de l'intensité de la turbulence longitudinale soit entièrement due à la présence du fil chauffant. Il y a une deuxième cause beaucoup plus importante. En effet, l'anémomètre à fil chaud employé pour ces essais n'a pas de compensation de l'inertie calorifique. Or les indications du fil chaud non-compensé dépendent essentiellement du spectre de la turbulence qui est modifié par l'introduction du fil chauffant. Même dans le cas ou la présence du fil ne changerait pas la valeur de l'énergie turbulente, l'intensité mesurée sera modifiée.

Ce fil produira sur son sillage une action qui rappelle celle d'un grillage dans le sens de la diminution de la longueur de corrélation. Comme je l'ai montré, dans ma note sur la mesure de l'intensité de la turbulence avec un fil chaud non-compensé, le rapport de l'intensité mesurée à l'intensité réelle croît quand la longueur de corrélation décroît.

On peut aussi s'attendre à ce que l'intensité de la turbulence transversale soit moins affectée par la présence du fil que la turbulence longitudinale.

On a constaté dans les laboratoires anglais et américains que l'influence de la présence d'un fil chauffant de 0,005 cm est pratique-

FIGURE G.4 – Les travaux en clandestinité de N. Frenkiel, p. 4



GD 32 I6242 5

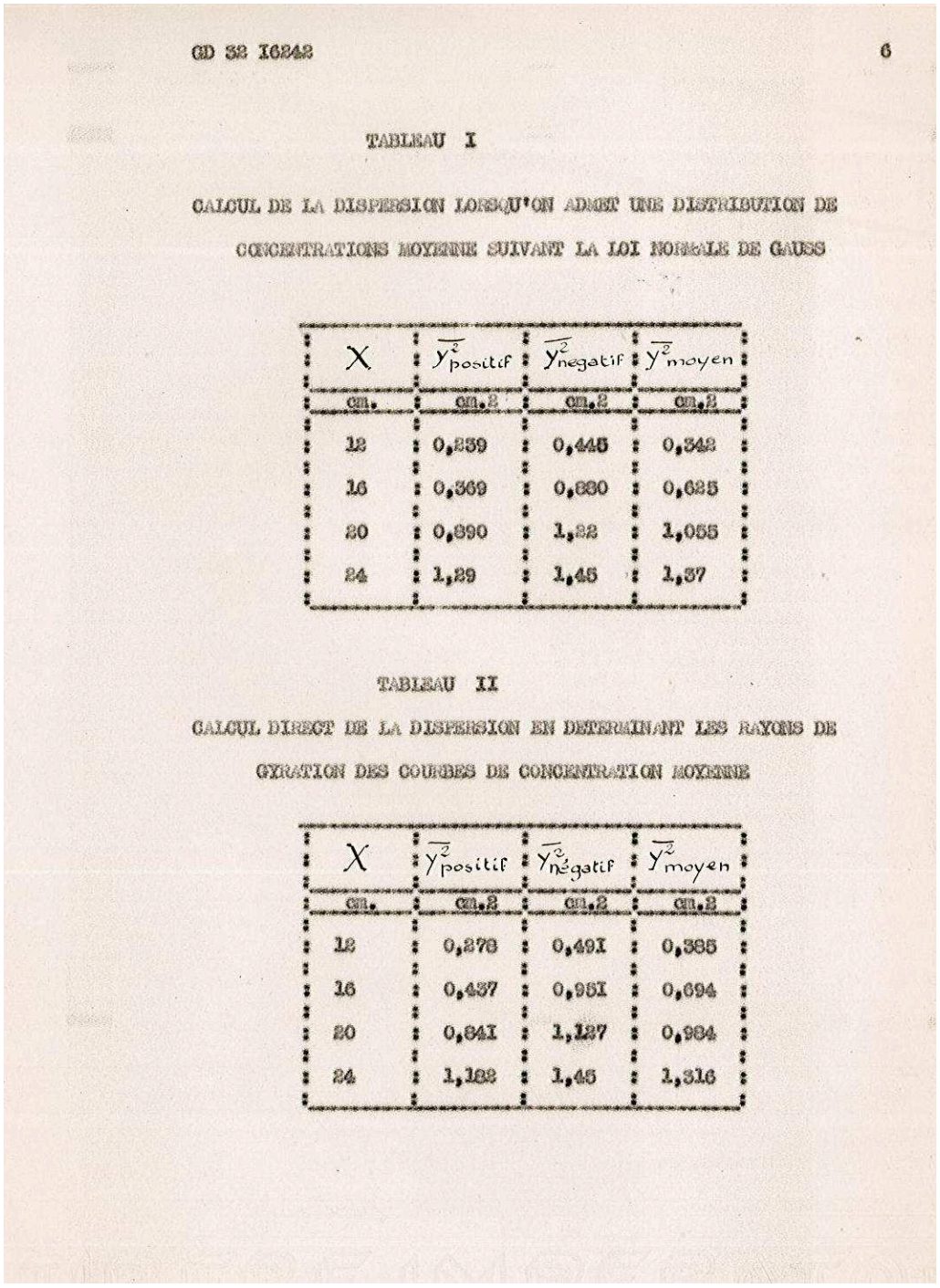
ment négligeable. On considère qu'on obtient des résultats très satisfaisants lorsque le nombre de Reynolds calculé avec le diamètre du fil chauffant ne dépasse pas I00. Pour le fil de 0,03 cm. employé dans les expériences étudiées ici ce nombre est de 80.

8. Comme les mesures sont faites à la sortie d'un collecteur de rapport de convergence de 20 : 1 il faut s'attendre à une grande différence entre l'intensité de la turbulence transversale et l'intensité de la turbulence longitudinale. En s'appuyant sur les résultats de mesure dans d'autres souffleries de même genre on peut s'attendre à avoir une intensité de la turbulence longitudinale de 0,5 à 2,5 pour cent.

TOULOUSE, JANVIER I942

F. Frenkiel

FIGURE G.5 – Pag. 5



GD 32 I6242 6

TABLEAU I

CALCUL DE LA DISPERSION LORSQU'ON ADMET UNE DISTRIBUTION DE CONCENTRATIONS MOYENNE SUIVANT LA LOI NORMALE DE GAUSS

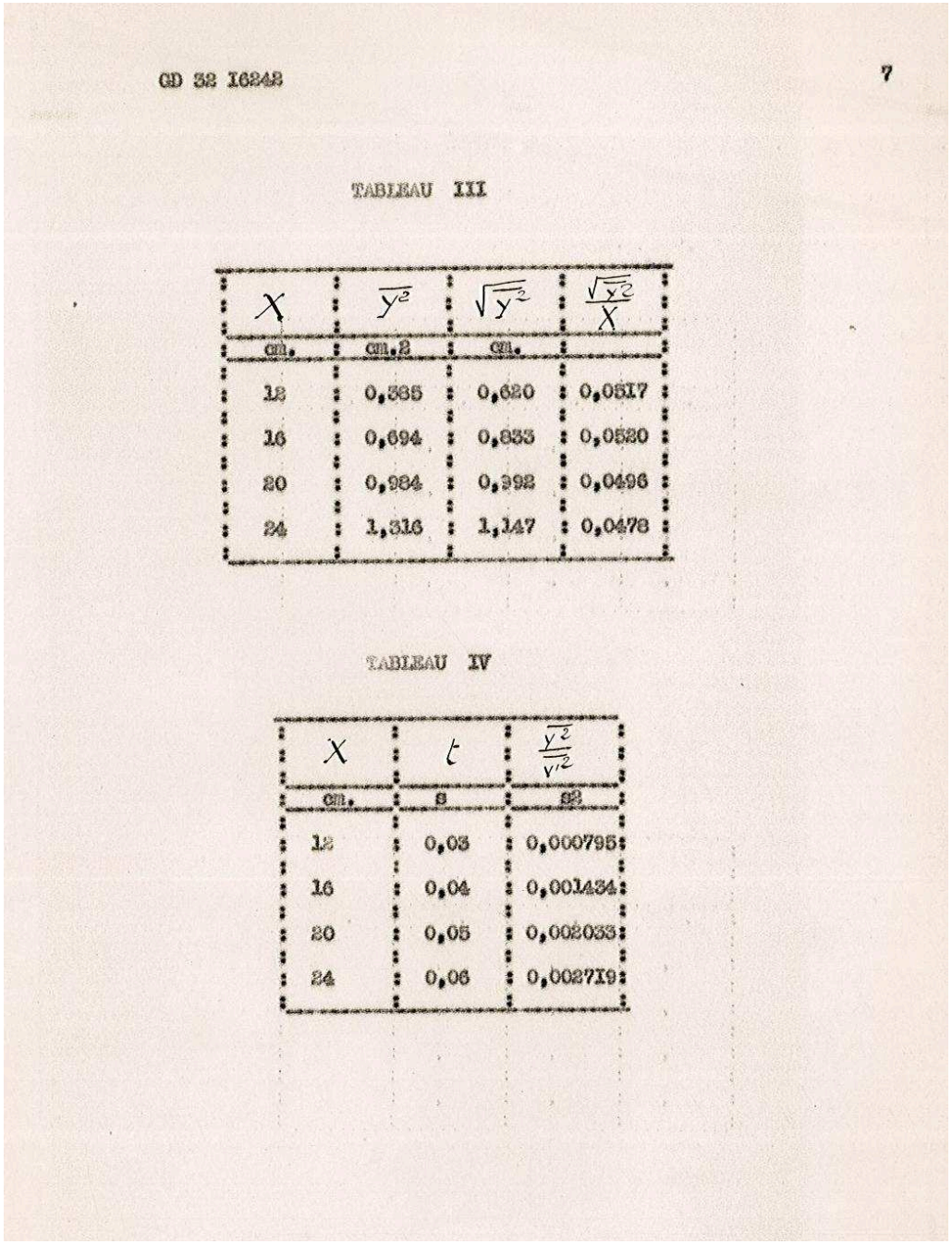
X	$\overline{y^2}_{positif}$	$\overline{y^2}_{negatif}$	$\overline{y^2}_{moyen}$
cm.	cm.2	cm.2	cm.2
12	0,259	0,445	0,342
16	0,369	0,880	0,625
20	0,890	1,22	1,055
24	1,29	1,45	1,37

TABLEAU II

CALCUL DIRECT DE LA DISPERSION EN DETERMINANT LES RAYONS DE GYRATION DES COURBES DE CONCENTRATION MOYENNE

X	$\overline{y^2}_{positif}$	$\overline{y^2}_{négatif}$	$\overline{y^2}_{moyen}$
cm.	cm.2	cm.2	cm.2
12	0,278	0,491	0,385
16	0,437	0,951	0,694
20	0,841	1,127	0,984
24	1,188	1,45	1,316

FIGURE G.6 – Les travaux en clandestinité de N. Frenkiel, p. 6



GD 32 I6248 7

TABLEAU III

X	$\overline{y^2}$	$\sqrt{\overline{y^2}}$	$\frac{\sqrt{\overline{y^2}}}{X}$
cm.	cm.2	cm.	
12	0,385	0,620	0,0517
16	0,694	0,833	0,0520
20	0,984	0,992	0,0496
24	1,316	1,147	0,0478

TABLEAU IV

X	t	$\frac{\overline{y^2}}{v^2}$
cm.	s	s2
12	0,03	0,000795
16	0,04	0,001434
20	0,05	0,002033
24	0,06	0,002719

FIGURE G.7 – Les travaux en clandestinité de N. Frenkiel, p. 7

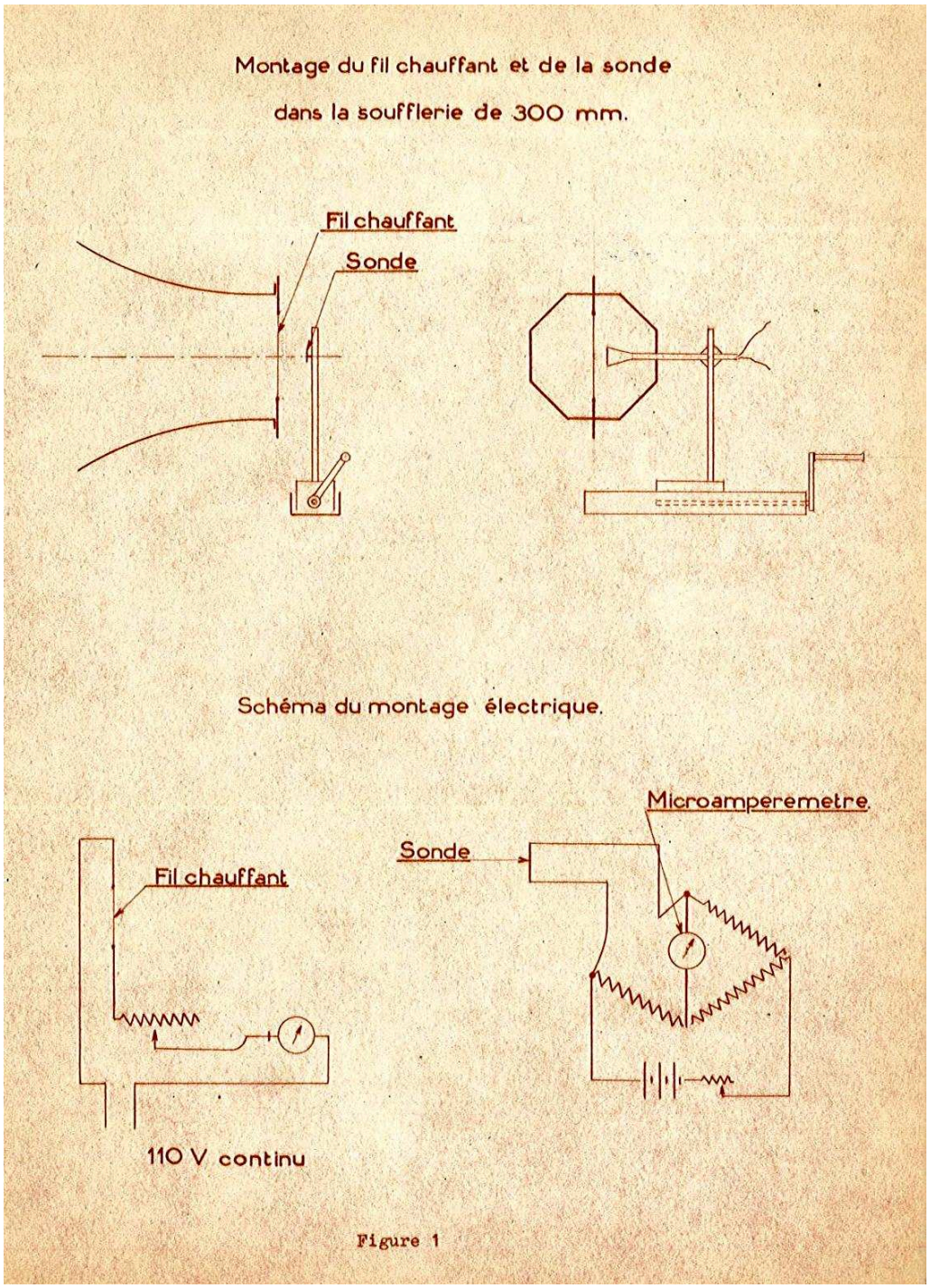


FIGURE G.8 – Les travaux en clandestinité de N. Frenkiel, p. 8

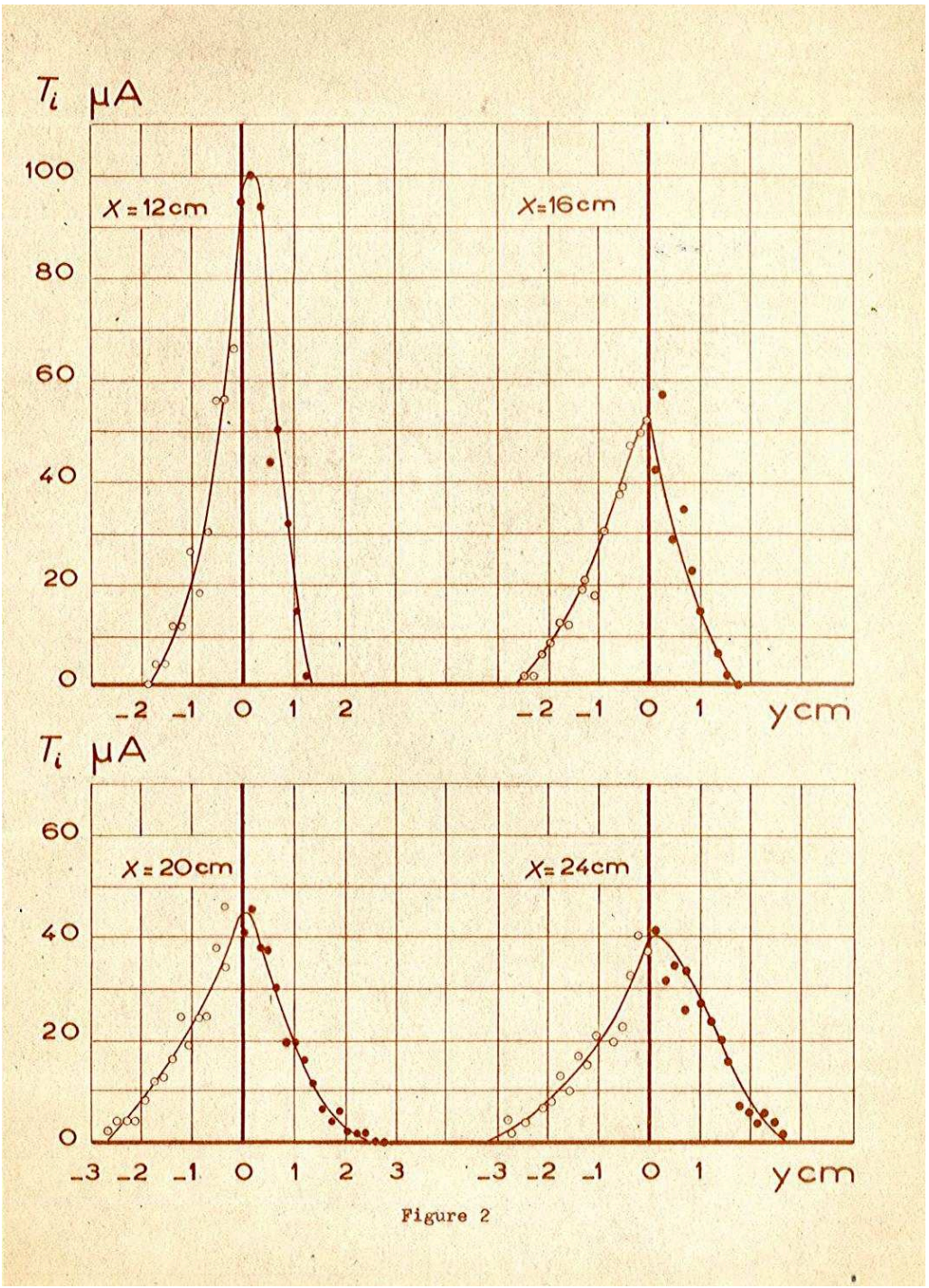


FIGURE G.9 – Les travaux en clandestinité de N. Frenkiel, p. 9

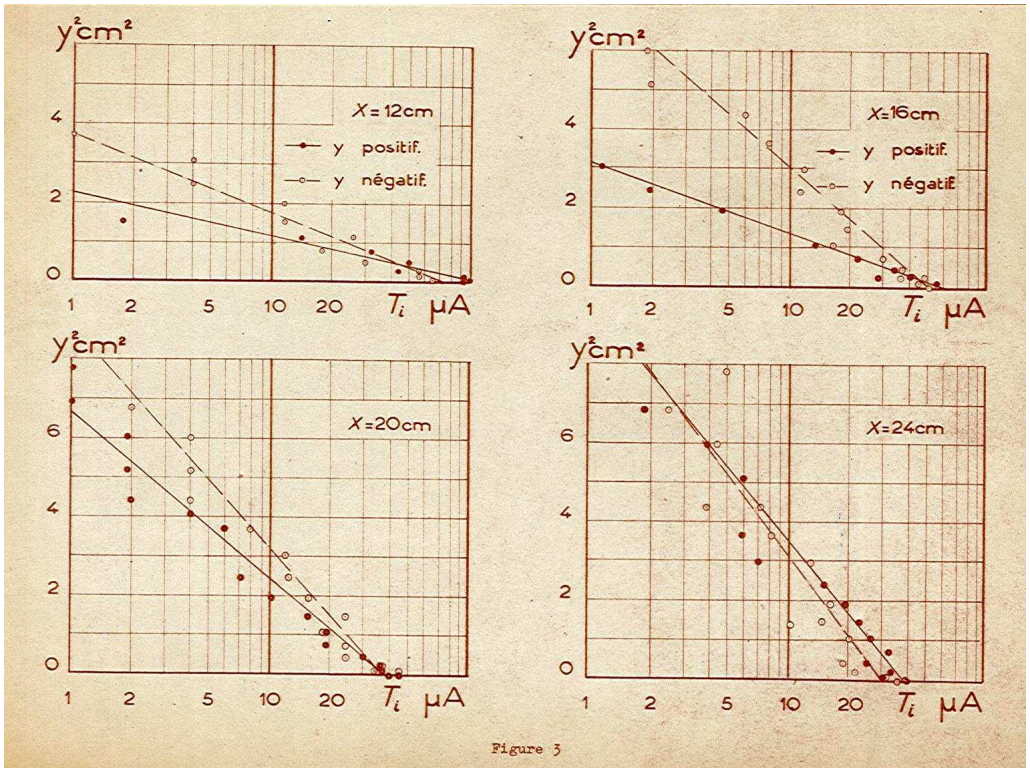


FIGURE G.10 – Les travaux en clandestinité de N. Frenkiel, p. 10

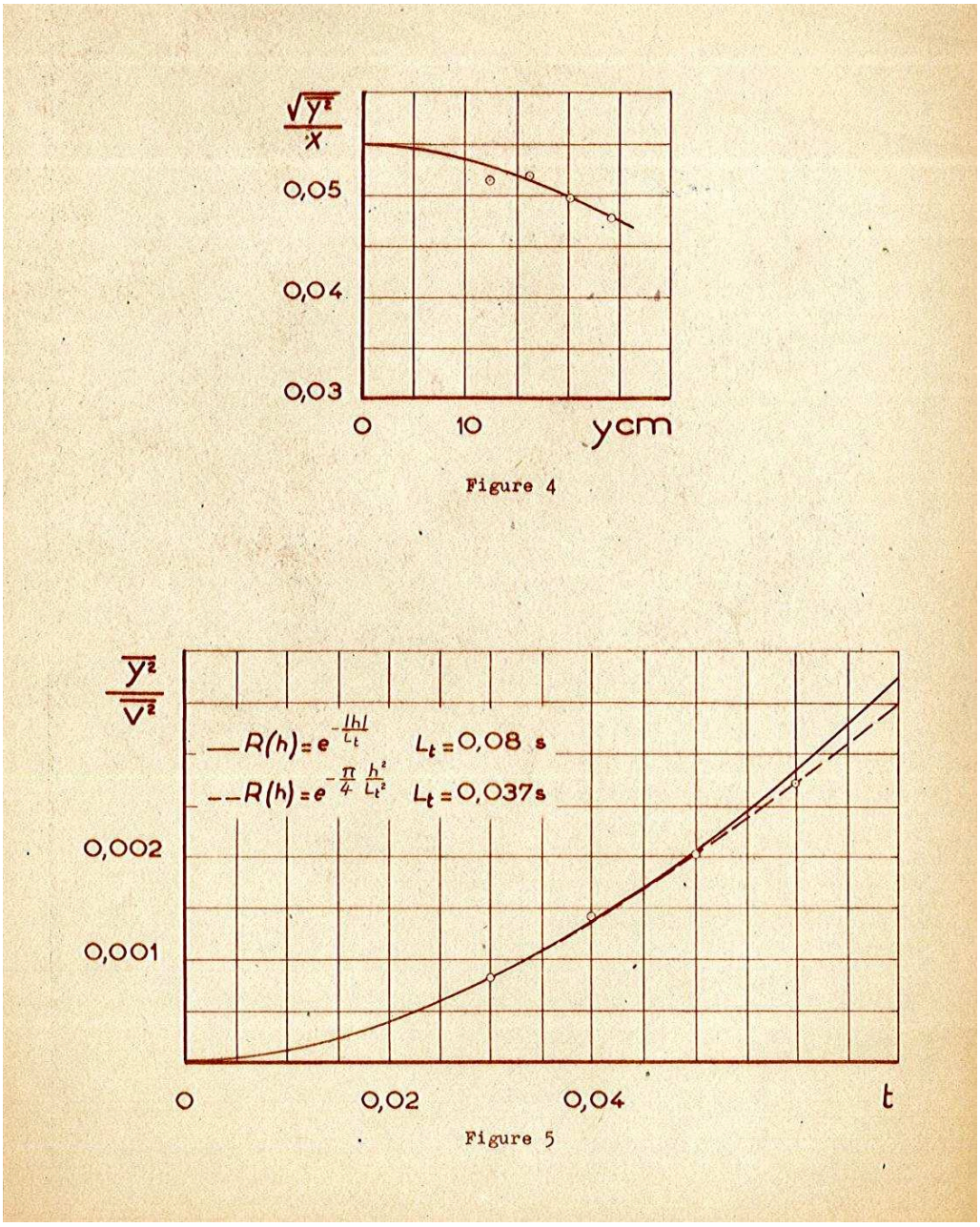


FIGURE G.11 – Les travaux en clandestinité de N. Frenkiel, p. 11

Sources d'Archives

[Archives de l'Académie des Sciences, 61 J, Fonds Villat].

[Archives de l'Académie des Sciences, 67 J, Fonds Fréchet].

[Archives de l'Académie des Sciences, dossier Kampé de Fériet]

[Archives de l'Académie des Sciences, dossier Pérès].

[Archives de l'Académie des Sciences, dossier de balistique, Commission nommée pour l'étude des questions la défense nationale].

[Archives de l'ASA, Annales de l'Université de Lille et de la Faculté des Sciences de Lille], Cité Scientifique, Villeneuve d'Ascq.

[Archives de l'Association des Centraliens de Lille], Lille.

[Archives de la Bibliothèque du Météo France], Saint-Mandé.

[Archives Départemental du Nord, dossier Kampé de Fériet], Lille.

[Archives Départementales du Pas-de-Calais, 81 J 1, Fonds Châtelet], Arras.

[Archives de l'ONERA Lille, Fonds Kampé de Fériet], Lille.

[Service historique de la défense-armée de la Marine, série H, Archives de la Commission de Gâvre], Lorient.

[Service historique de la défense-armée de Terre, SHD-Terre, 2W292-2W293, Archives techniques de l'Artillerie], Vincennes.

[Archives California Institute of Technology (Caltech) , Papers of Theodore

von Kármán, Box/Folder 14.47 et 14.48, Pasadena, California.

[Institute Archives and Special Collections MIT Libraries, Norbert Wiener Papers, Box 3 Folder 51 - Box 3 Folder 54], Cambridge, Massachusetts.

Bibliographie

[Adhémar 1921] Adhémar, Robert d. : "Physiciens et mathématiciens". Dans : *Revue générale des sciences pures et appliquées* (1921), pp. 273–275. 265, 266

[Adhémar 1922] Adhémar, Robert d. : Aperçus théoriques sur la rèsistance des fluides. Dans : *Revue générale des sciences pures et appliquées* (1922), pp. 152. 213

[Anderson 1997] Anderson, John D. : *A History of Aerodynamics : And Its Impact on Flying Machines*. Cambridge University Press, 1997. 80, 216

[Anizan 2006] Anizan, Anne-Laure : Paul Painlevé (1863-1933) un scientifique en politique, Thèse de doctorat, Institut d'études politiques, Paris. 2006. 24, 25, 81

[Appell 1913a] Appell, Paul : Les polynômes $U_{m,n}$ d'Hermite, et leurs analogues rattachés aux fonctions sphériques dans l'hyperspace. Dans : *Comptes rendus de l'Académie des sciences* **156** (1913), pp. 1582–1585. 55

[Appell 1913b] Appell, Paul : Les polynômes $V_{m,n}$ d'Hermite et leurs analogues rattachés aux potentiels à q variables. Dans : *Rendiconti circolo matematico di Palermo* **36** (1913), pp. 203–212. 55

[Archibald et Kent 2014] Archibald, Thomas et Kent, Deborah : A mobilized community : Mathematicians in the United States during the First World War. Dans : Aubin, David (Dir.) et Goldstein, Catherine (Dir.) : *The war of guns and mathematics*, Vol. 42. Amer. Math. Soc., Providence, RI, 2014, pp. 229–271. 28

[Aubin 1998] Aubin, David : chapitre VII : Strange Attractors,. Dans : *A Cultural History of Catastrophes and Chaos : Around the Institut des Hautes Études Scientifiques, France 1958-1980*. Ph. D. thesis (Princeton University) UMI, 1998. 268

[Aubin 2006] Aubin, David : "Audacity or Precision" : The Paradoxes of Henri Villat's Fluid Mechanics in Interwar France. 2006. – Proceedings of the Workshop on the History of Fluid Mechanics, Rauischholzhauschen, 15-18 October 2006. 8, 22, 88, 106, 206, 216, 219, 265

[Aubin 2008–09] Aubin, David : 'The Memory of Life Itself' : Bénard's Cells and the Cinematography of Self-Organization. Dans : *Studies in History and Philosophy of Science Part A* 39(3) (2008-09), pp. 359–369. 158

[Aubin 2009] Aubin, David : Observatory Mathematics in the Nineteenth Century,. Dans : Robson, Eleanor (Dir.) et Stedall, Jacqueline (Dir.) : *The Oxford Handbook of the History of Mathematics*. OUP Oxford, 2009, pp. 273–298. 7

[Aubin 2014] Aubin, David : "I'm Just a Mathematician " : Why and How Mathematicians Collaborated with Military Ballisticians at Gâvre. Dans : Aubin, David (Dir.) et Goldstein, Catherine (Dir.) : *The war of guns and mathematics*, Vol. 42. Amer. Math. Soc., Providence, RI, 2014, pp. 1–54. 28, 34, 37, 46

[Aubin et. al. 2014] Aubin, David ; Gispert, Hélène et Goldstein, Catherine : The total war of Paris mathematicians. Dans : Aubin, David (Dir.) et Catherine, Goldstein (Dir.) : *The war of guns and mathematics*, Vol. 42. Amer. Math. Soc., Providence, RI, 2014, pp. 125–177. 22, 23, 207

[Aubin et Goldstein 2014a] Aubin, David et Goldstein, Catherine : Placing World War I in the History of Mathematics. Dans : Aubin, David (Dir.) et Goldstein, Catherine (Dir.) : *The war of guns and mathematics*, Vol. 42. Amer. Math. Soc., Providence, RI, 2014, pp. 59–124. 41

[Aubin et Goldstein 2014b] Aubin, David et Goldstein, Catherine : *The War of Guns and Mathematics : Mathematical Practices and Communities in France and Its Western Allies around World War I*. American Mathematical Society, 2014. 22, 40

[Audin 2009a] Audin, Michèle : *Fatou, Julia, Montel, : le grand prix des sciences mathématiques de 1918, et après...* Springer Science & Business Media, 2009. 22

[Audin 2009b] Audin, Michèle : Publier sous l'Occupation I. Autour du cas de Jacques Feldbau à l'Académie des sciences. Dans : *Revue d'Histoire des Mathématiques* 15(1) (2009), pp. 7–57. 272

[Banal et. al. 2002–08] Banal, Michel ; Perrin, Max et Thirriot, Claude : Histoire de La SHF. Dans : *La Houille Blanche* (4-5) (2002-08), pp. 15–19. 91

[Barberousse 2002] Barberousse, Anouk : *La mécanique statistique : de Clausius à Gibbs*. Belin, 2002. – 239 p. 162

[Barbut et. al. 2014] Barbut, Marc ; Locker, Bernard et Mazliak, Laurent : *Paul Lévy and Maurice Fréchet*. Springer London, 2014 (Sources and Studies in the History of Mathematics and Physical Sciences). 236, 240, 241, 255, 264

[Barrow-Green 2014] Barrow-Green, June : Cambridge mathematicians' responses to the First World War. Dans : Aubin, David (Dir.) et Goldstein, Catherine (Dir.) : *The war of guns and mathematics*, Vol. 42. Amer. Math. Soc., Providence, RI, 2014, pp. 181–227. 28, 139

[Bass 1946] Bass, Jean : *Le méthodes modernes du calcul des probabilités et leur application au problème de la turbulence*. L. Bonnat, 1946. – 254 p. 161, 170, 174, 233

[Bass 1999] Bass, Jean : Les méthodes probabilistes de la turbulence au milieu du eXX siècle. Dans : *Matapli* 58 (1999), pp. 49–56. 200

[Bass et. al. 1945a] Bass, Jean ; Dedebant, Georges et Wehrlé, Philippe : Les équations différentielles aléatoires. Dans : *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences* **221** (1945), pp. 168–170. 173

[Bass et. al. 1945b] Bass, Jean ; Dedebant, Georges et Wehrlé, Philippe : Sur la connexion aléatoire d'un fluide. Application à la turbulence. Dans : *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences* 220 (1945), pp. 165–168. 173

[Batchelor 1953] Batchelor, George : *The theory of homogeneous turbulence*. Cambridge University Press, 1953. – 197 p. 201

[Battimelli 1986] Battimelli, Giovanni : On the History of the Statistical Theories of Turbulence. Dans : *Revista Mexicana de Fisica (suplemento)* 32 (1986), pp. 3–48. 148, 150, 153, 154, 183, 212, 251

[Battimelli 1996] Battimelli, Giovanni : "'Senza alcun vincolo ufficiale' : Tullio Levi-Civita e i Congressi Internazionali di Meccanica Applicata". Dans : *Rivista di Storia della Scienza* 4 (1996), pp. 51–80. 89, 90

[Battimelli et Vulpiani 1982] Battimelli, Giovanni et Vulpiani, Angelo : Kolmogorov, Heisenberg, von Weizsacker, Onsager : un caso di scoperta simultanea". Dans : *Atti del III Congresso Nazionale di Storia della Fisica (Palermo 1982), Palermo* (1982), pp. 169–175. 233

[Beaudouin 2005] Beaudouin, Denis : *Charles Beaudouin : Une histoire d'instruments scientifiques*. EDP Sciences, 2005. – 297 p. 280

[Beaulieu 1989] Beaulieu, Liliane : *Bourbaki, une histoire du groupe de mathématiciens français et de ses travaux (1934-1944)*. Université de Montréal, 1989. 6

[Belhoste et Kostantinos 1998] Belhoste, Bruno et Kostantinos, Chatzis : L'enseignement de la mécanique appliquée en France au début du XXe siècle Bruno Belhoste Institut national de recherche pédagogique. Dans : Fontanon, Claudine (Dir.) : *Histoire de la mécanique appliquée : enseignement, recherche et pratiques mécaniciennes en France après 1880*. ENS Editions, 1998, pp. 29–46. 89

[Benoit 1998] Benoit, Serge : La recherche expérimentale en mécanique et ses conséquances industrielles : le cas de la construction française de turbines hydrauliques (1870-1950). Dans : Fontanon, Claudine (Dir.) : *Histoire de la mécanique appliquée : enseignement, recherche et pratiques mécaniciennes en France après 1880*. ENS Editions, 1998, pp. 89–135. 93

[Benzi 2011] Benzi, Roberto : Lewis Fry Richardson. Dans : Davidson, Peter A. (Dir.) ; Kaneda, Yukio (Dir.) ; Moffatt, Keith (Dir.) et Sreenivasan, Katepalli R. (Dir.) : *A Voyage Through Turbulence*. Cambridge University Press, 2011, pp. 187–208. 152

[Berker 1936] Berker, Ratib A. ; thèse, Université Lille1-Sciences et T. (Dir.) : *Sur quelques cas d'intégration des équations du mouvement d'un fluide visqueux incompressible*. 1936. 224

[Birck et Grelon 2006] Birck, Françoise et Grelon, André : *Un Siècle de formation des ingénieurs électriciens : Ancrage local et dynamique européenne, l'exemple de Nancy*. Les Editions de la MSH, 2006. – pp. 520 p. 90, 92

[Blanc-Lapierre et Fortet 1953] Blanc-Lapierre, André et Fortet, Robert : *Théorie des Fonctions aléatoires*. Masson, Par, 1953. – 693 pp. p. 234, 235, 240, 268

[Bodenschatz et Eckert 2011] Bodenschatz, Eberhard et Eckert, Michael : Prandtl and the Göttingen school. Dans : Davidson, Peter A. (Dir.) ; Kaneda, Yukio (Dir.) ; Moffatt, Keith (Dir.) et Sreenivasan, Katepalli R. (Dir.) : *A Voyage Through Turbulence*. Cambridge University Press, 2011, pp. 40–100. 145, 146, 147

[Bourbaki 1974] Bourbaki, Nicolas : *Éléments d'histoire des mathématiques*. Paris : Hermann, 1974. – 256 p. 236

[Brezinski et Tournès 2014] Brezinski, Claude et Tournès, Dominique : *André-Louis Cholesky (1875-1918), Mathematician, Topographer and Army Officer*. Birkhäuser, 2014. 33

[Brillouin 1911] Brillouin, Marcel : Les surfaces de glissement d'Helmotz et la résistance des fluides. Dans : *Ann. de Chim. et de Phys.* 23 (1911). 222

[Bru 1998] Bru, Bernard : À propos des modèles probabilistes de turbulence au début du XXe siècle. H. Villat (1879–1972) et G.-1. Taylor (1886–1975). Dans : *Matapli* 55 (1998), pp. 51–65. 212

[Bru 2002] Bru, Bernard : L'oeuvre scientifique de Robert Fortet. Dans : Brissaud, Marcel (Dir.) : *Écrits sur les processus aléatoires, mélanges en hommage à Robert Fortet*. Paris : Hermès Science Publications, 2002, pp. 19–50. 236

[Burrin 1997] Burrin, Philippe : *La France à l'heure Allemande (1940-1944), Philippe Burrin, Sciences Humaines - Seuil*. Points, 1997. 272

[Bustamante et. al. 2015] Bustamante, M.-C. ; Cléry, M. et Mazliak, L. : Le Traité Du Calcul Des Probabilités et de Ses Applications : Étendue et Limites d'un Projet Borélien de Grande Envergure (1921-1939). Dans : *North-Western European Journal of Mathematics* 1 (2015), pp. 85–123. 73

[Carpentier 2011] Carpentier, Jean : *Cent vingt ans d'innovations en aéronautique*. Hermann, 2011. – pp. 733. 80, 95, 96, 97

[Cavalli 1919] Cavalli, Ettore : Sui contributi necessari al progresso della balistica. Dans : *Rivista di Artiglieria e Genio* **36** (1919), pp. 5–84. 60

[Chabert et Gilain 2014] Chabert, Jean-Luc et Gilain, Christian : Debating the place of Mathematics at the Ecole polytechnique around World War I. Dans : Aubin, David (Dir.) et Goldstein, Catherine (Dir.) : *The war of guns and mathematics*, Vol. 42. Amer. Math. Soc., Providence, RI, 2014, pp. 125–177. 28, 89

[Chadeau 1985] Chadeau, Emmanuel : État, industrie, nation : la formation des technologies aéronautiques en France (1900-1950). Dans : *Histoire, économie et société* 4(2) (1985), pp. 275–300. 80

[Chalvet 1931] Chalvet, M. : Application de la photographie à l'artillerie. Dans : *Mémorial de l'Artillerie française* **1**(2) (1931), pp. 399–454. 40, 65

[Chanetz 2017–08] Chanetz, Bruno : A Century of Wind Tunnels since Eiffel. Dans : *Comptes Rendus Mécanique* 345(8) (2017-08), pp. 581–594. 110

[Chanetz et. al. 2017] Chanetz, Bruno ; Délery, Jean ; Patrick, Gilliéron ; Patrick, Gnemmi et Philippe, Perrier : *Aérodynamique Expérimentale. Souffleries et Méthodes de Mesure*. Editions Cépaduès, 2017. 8

[Charbonnier 1906] Charbonnier, Prosper-Jules : Historique de la Balistique Extérieure à la Commission de Gâvre. Dans : *Revue Maritime* **168** (1906), pp. 411–476. 30

[Charbonnier 1927] Charbonnier, Prosper-Jules : *Traité de balistique extérieure*. Vol. 2. Paris : Gauthier-Villars, 1927. 36, 51, 53, 59

[Charbonnier 1928] Charbonnier, Prosper-Jules : Sur l'état actuel de la balistique extérieure théorique. Dans : Fields, John C. (Dir.) : *Proceedings of the International Mathamatical Congress Held in Toronto*, Vol. 2 vols. Toronto : University of Toronto Press, August, 1928, pp. 571–594. 52, 56, 57

[Charru 2016] Charru, François : *L'Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse*. CNRS Editions, 2016. 128

[Charru 2017–08] Charru, François : Une histoire de l'Institut de mécanique des fluides de Toulouse de 1913 à 1970. Dans : *Comptes Rendus Mécanique* 345(8) (2017-08), pp. 505–544. 8, 82, 91, 92, 128, 311

[Condette 1997] Condette, Jean-François : *Histoire de la Faculté des lettres de Lille de 1887 à 1974 : les métamorphoses d'une institution universitaire française*, Thèse de Doctorat, 1997. – 4 vol. (1420 p.) p. – Thèse de doctorat dirigée par Ménager, Bernard Histoire Lille 3 1997. 98

[Craik 2011] Craik, Alex D. : Victorian "Applied Mathematics". Dans : Flood, Raymond (Dir.) ; Rice, Adrian (Dir.) et Wilson, Robin (Dir.) : *Mathematics in Victorian Britain*. Oxford University Press, 2011. 138

[Crémieux 1930] Crémieux, Maxime : la Commission de Gâvre. Dans : *Revue Maritime et coloniale* **168** (1930), pp. 143–161. 30

[D'Adhémar 1934] D'Adhémar, Robert : *La balistique extérieure*. Paris : Gauthier-Villars, 1934. xv, 43, 56

[Dahan Dalmedico 1996] Dahan Dalmedico, Amy : L'essor des mathématiques appliquées aux États-Unis : l'impact de la seconde guerre mondiale. Dans : *Revue d'histoire des mathématiques*, 2(2) (1996), pp. 149–213. 4, 212, 314

[D'Alembert 1744] D'Alembert, Jean Le R. : *Traité de l'équilibre et du mouvement des fluides*. Paris : David, 1744. 46

[Darrieus 1922] Darrieus, Georges : Sur une nouvelle cause de variation de portée due à la température. Dans : *Mémorial de l'Artillerie française* **1**(2) (1922), pp. 241. xv, 62

[Darrigol 2002a] Darrigol, Olivier : Between Hydrodynamics and Elasticity Theory : The First Five Births of the Navier-Stokes Equation. Dans : *Archive for History of Exact Sciences* 56(2) (2002), pp. 95–150. 138

[Darrigol 2002b] Darrigol, Olivier : Stability and instability in nineteenth-century fluid mechanics. Dans : *Revue d'histoire des mathématiques* 8(1) (2002), pp. 5–66. 145

[Darrigol 2005] Darrigol, Olivier : *Worlds of Flow : A History of Hydrodynamics from the Bernoullis to Prandtl*. OUP Oxford, 2005. – 372 p. 8, 138

[Darrigol 2013] Darrigol, Olivier : For a philosophy of hydrodynamics. Dans : Batterman, Robert (Dir.) : *The Oxford handbook of philosophy of physics*. Oxford University Press, 2013, pp. 12–42. – URL https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-01502018. 138

[Darrigol 2017–07] Darrigol, Olivier : Joseph Boussinesq's Legacy in Fluid Mechanics. Dans : *Comptes Rendus Mécanique* 345(7) (2017-07), pp. 427–445. 94

[Davidson et. al. 2011] Davidson, Peter A. ; Kaneda, Yukio ; Moffatt, Keith et Sreenivasan, Katepalli R. : *A Voyage Through Turbulence*. Cambridge University Press, 2011. – 451 p. 143, 160

[Dedebant et Wehrlé 1935] Dedebant, Georges et Wehrlé, Philippe : *La mécanique de l'atmosphère et des grands milieux fluides fondée sur les concepts d'échelle et de probabilité*. Institut d'histoire des sciences et de techniques de l'universités de Paris. Thalès Editeur, 1935. 165

[Dedebant et Wehrlé 1938] Dedebant, Georges et Wehrlé, Philippe : Sur les équations aux valeurs probables. Dans : *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences* **206** (1938), pp. 1790–1792. 168, 174

[Dedebant et Wehrlé 1939] Dedebant, Georges et Wehrlé, Philippe : La définition de la turbulence. Dans : *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences* **208** (1939), pp. 625–628. 172

[Dedebant et Wehrlé 1944a] Dedebant, Georges et Wehrlé, Philippe : Mécanique aléatoire. Deuxième partie : Applications physiques. Dans : *Portugaliae Physica* **1** (1944), pp. 197–294. 161

[Dedebant et Wehrlé 1944b] Dedebant, Georges et Wehrlé, Philippe : Mécanique aléatoire. Première partie : Le calcul aléatoire. Dans : *Portugaliae Physica* **1** (1944), pp. 95–149. 161, 170, 173, 200

[Dedebant et Wehrlé novembre 1938] Dedebant, Georges et Wehrlé, Philippe : Les bases de la Mécanique de l'Atmosphère. Le rôle de l'échelle et le point de vue statistique. Dans : *La Nature* (novembre 1938), pp. 33a–33d. 165, 168

[Dedebant et. al. 1934] Dedebant, Georges ; Wehrlé, Philippe et Scheres-chewsky, Philippe : Sur la similitude statistique dans les mouvements turbulents des fluides. Dans : *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences* **198** (1934), pp. 1571–1573. 162

[Dedebant et. al. 1935] Dedebant, Georges ; Wehrlé, Philippe et Scheres-chewsky, Philippe : Le maximum de probabilité dans les mouvements permanents. Dans : *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences* **200** (1935), pp. 203–205. 164

[Delporte 2002] Delporte, Jean : USTL, Secrétariat scientifique, U.F.R. de mathématiques pures et appliquées, Villeneuve d'Ascq,, 2002. 12, 54, 55

[Descamps 1937a] Descamps, Alfred : Sur l'exploration en soufflerie d'une maquette du Cervin. Dans : *Association des Ingènieurs de l'Ecole des Mines de Mons* 61 (1937). 195

[Descamps 1937b] Descamps, Alfred : Une campagne d'étude des courants aériens à la Station scientifique de Jungfraujoch. Dans : *Association des Ingènieurs de l'Ecole des Mines de Mons* 61 (1937). 194

[Descamps 1940] Descamps, Alfred : Le premier camp d'aérologie alpine du Club Alpin Français. Dans : *Ciel et Terre* 4 (1940). 196

[Dold et Eckmann 1974] Dold, A. et Eckmann, B. : Springer Verlag Berlin, Heidelberg, New-York, 1974. – Actes des Rencontres de Marseille-Luminy 5-7 juin 1973, Lectures notes in Mathematics 398. 318

[Drach 1908] Drach, Jules : Sur le problème logique de l'intégration des équations différentielles. Dans : *Annales de la Faculté des Sciences de Toulouse* **10**(2) (1908), pp. 125–164. 48

[Drach 1914] Drach, Jules : Sur les équations différentielles du premier ordre et du premier degré. Dans : *CRAS* **158** (1914), pp. 926–929. 47, 49

[Drach 1920] Drach, Jules : L'équation différentielle de la Balistique extérieure. Dans : *Annales de l'École Normale Supérieure* **37**(3) (1920), pp. 1–94. 47, 49, 50

[Dryden et Kuethe 1931] Dryden, H. L. et Kuethe, A. M. : Effect of Turbulence in Wind-Tunnel Measurements. 1931. – NACA Technical Report 342. 183

[Dryden 1937] Dryden, Hugh L. : Measurements of Intensity and Scale of Wind-Tunnel Turbulence and Their Relation to the Critical Reynolds Number of Spheres. 1937. – NACA Technical Report 581. 153, 184

[Dupont 1938] Dupont, Paul : Contribution à l'étude du vol en atmosphère agitée (études menées par la Commission de la turbulence atmosphérique et le Service technique et des recherches scientifiques de l'Aéronautique) : rapport sur la campagne du "Potez 540" à la Banne d'Ordanche, du 19 au 30 septembre 1936. Dans : *Publications scientifiques et techniques du Ministère de l'air, Bulletin des services techniques* 77 (1938). 157, 198

[Eckert 2007] Eckert, Michael : *The Dawn of Fluid Dynamics : A Discipline Between Science and Technology*. John Wiley & Sons, 2007. – 299 p. 9, 138, 147, 212, 215, 251, 303

[Eckert 2008] Eckert, Michael : Theory from Wind Tunnels : Empirical Roots of Twentieth Century Fluid Dynamics. Dans : *Centaurus* 50(3) (2008), pp. 233–253. 141, 150

[Eckert 2012] Eckert, Michael : Turbulence before Marseille 1961. Dans : *Journal of Turbulence* 13 (2012), pp. N44. 138, 314

[Eckert 2013] Eckert, Michael : *Arnold Sommerfeld*. New York, NY : Springer New York, 2013. 146

[Eden et Irzik 2012] Eden, Alp et Irzik, Gurol : German Mathematicians in Exile in Turkey : Richard von Mises, William Prager, Hilda Geiringer, and Their Impact on Turkish Mathematics. Dans : *Historia Mathematica* 39(4) (2012), pp. 432–459. 218, 231

[Ehrhardt 2012] Ehrhardt, Caroline : Approche biographique et biographie en histoire des mathématiques : le cas d'Évariste Galois. Dans : Rollet, Laurent (Dir.) et Philippe, Nabonnand (Dir.) : *Les uns et les autres... Biographies et prosopographies en histoire des sciences*. Presses Universitaires de Lorraine, 2012, pp. 95–118. 14

[Emrich et. al. 1987] Emrich, Raymond J. ; Klebanoff, Philip S. ; Elsasser, Walter M. et Polachek, Harry : François N. Frenkiel. Dans : *Physics Today* 40 (1987), pp. 123–124. 288

[d'Abzac Epezy 1997] Epezy, Claude d'Abzac : *L'Armée de l'air des années noires : Vichy, 1940-1944*. Economica, 1997. – 412 p. 300

[Falkovich 2011] Falkovich, G. : The Russian school. Dans : Davidson, Peter A. (Dir.) ; Kaneda, Yukio (Dir.) ; Moffatt, Keith (Dir.) et Sreenivasan, Katepalli R. (Dir.) : *A Voyage Through Turbulence*. Cambridge University Press, 2011, pp. 209–237. 143, 239

[Farge 1992] Farge, Marie : Evolution des theories sur la turbulence développée. Dans : Dahan Dalmedico, A. (Dir.) ; Chabert, J.-L. (Dir.) et Chemla, K. (Dir.) : *Chaos et déterminisme*. Editions du Seuil, collection "Points Sciences", 1992. 145, 232, 233, 268

[Farge et Guyon 1999] Farge, Marie et Guyon, Etienne : A Philosophical and Historical Journey through Mixing and Fully-Developed Turbulence. Dans : Chaté, H. (Dir.) ; Villermaux, E. (Dir.) et Chomaz, J.-M. (Dir.) : *Mixing* Vol. 373. Boston, MA : Springer US, 1999, pp. 11–36. 145, 232, 268, 269

[Fauquet 1946] Fauquet, André : Uniformisation de la pression dans une veine guidée de soufflerie. Dans : *Rapport technique du G.R.A numéro 44* (1946). xvi, 287

[Favre 1976] Favre, Alexandre : *La Turbulence en mécanique des fluides : bases théoriques et expérimentales, méthodes statistiques*. Gauthier-Villars, 1976. – 438 p. 203

[Fontanon 1998] Fontanon, Claudine : La naissance de l'aérodynamique expérimantale et ses applications à l'aviation. Une nouvelle configuration sociotechnique (1904-1921). Dans : Fontanon, Claudine (Dir.) : *Histoire de la mécanique appliquée : enseignement, recherche et pratiques mécaniciennes en France après 1880*. ENS Editions, 1998, pp. 57–88. 80, 96

[Fontanon 2004] Fontanon, Claudine : Eiffel, Darrieus et l'aviation. Dans : *Le Paris des centraliens*. Paris, 2004, pp. 185–188. 62

[Fontanon 2006] Fontanon, Claudine : Painlevé et l'aviation : à l'origine de la recherche publique. Dans : Franck Robert, Fontanon C. et (Dir.) : *Paul Painlevé : Un savant en politique*. Presses universitaires de Renndes, 2006, pp. 41–56. 8

[Fontanon 2017] Fontanon, Claudine : La mécanique des fluides à la Sorbonne entre les deux guerres. Dans : *Comptes Rendus Mécanique* 345(8) (2017), pp. 545 – 555. 8, 81, 82, 102, 114, 117, 126, 128, 214, 217, 253, 311

[Fontanon et Gouzévitch 2012–01–01] Fontanon, Claudine et Gouzévitch, Irina : Histoire des sciences appliquées, XIXe-XXe siècles. Dans : *Annuaire de l'EHESS. Comptes rendus des cours et conférences* (2012-01-01), pp. 162–164. 273

[météorologique de France 2011] France, Société météorologique de : La Météorologie en France En 1924 : Rapport Parlementaire. 2011, pp. 42. 156

[Frenkiel 1946a] Frenkiel, Naftali : Etude de la diffusion turbulente par une méthode colorimétre. Dans : *CRAS* 222 (1946), pp. pp. 367, 473, 585, 1331, 1474. 288, 294, 295

[Frenkiel 1946b] Frenkiel, Naftali : L'emploi de l'anémomètre à fil chaud dans l'étude de la turbulence. Dans : *Rapport technique du G.R.A numéro 47* (1946). 294

[Frenkiel 1948] Frenkiel, Naftali : Etude statistique de la turbulence : fonction spectrale et coefficient de corrélation. Dans : *Rapport technique du G.R.A numéro 34* (1948). 291, 292

[Galvez-Behar 2005] Galvez-Behar, Gabriel : Le savant, l'inventeur et le politique le rôle du sous-secrétariat d'état aux inventions durant la première guerre mondiale. Dans : *Vingtième Siècle. Revue d'histoire* no 85(1) (2005), pp. 103–117. 28

[Garnier 1922] Garnier, Maurice : Sur les corrections de l'élasticité et de la densité de l'air. Dans : *Mémorial de l'Artillerie française* **1**(2) (1922), pp. 271–282. 63

[Gauthier 2007] Gauthier, Sébastien : La géométrie des nombres comme discipline (1890-1945). 2007. – Thèse de l'université Pierre et Marie Curie Paris 6. 316

[Gauthier 2018] Gauthier, Sébastien : Albert Châtelet (1883-1960) : De la théorie des nombres à la politique universitaire. 2018. – à paraitre. 23

[Geison 1981] Geison, Gerald : Scientific change, emerging specialties, and research schools. Dans : *Hist. Sci.* 19 (1981), pp. 20–40. 160

[GIBLETT 1932] GIBLETT, Maurice A. : The Structure of Wind Over Level Country. Report on Experiments Carried Out at the Royal Airship Works, Cardington. By the Late M.A. Giblett, M. Sc., Superintendent of the Airship Division of the Meteorological Office, and Other Members of the Staff of the Office. [With Plates.]. Meteorological Office, 1932. 157

[Ginzburg et Poni 1981] Ginzburg, Carlo et Poni, Carlo : La micro-histoire. Dans : *Le Débat* 17(10) (1981), pp. 133. 16

[Gispert et Leloup 2009] Gispert, Hélène et Leloup, Juliette : Des patrons des mathématiques en France dans l'entre-deux-guerres, Résumé, Summary. Dans : *Revue d'histoire des sciences* 62(1) (2009), pp. 39–117. 6, 87, 255

[Gluchoff 2011] Gluchoff, Alan : Artillerymen and Mathematicians : Forest Ray Moulton and Changes in American Exterior Ballistics, 1885–1934. Dans : *Historia Mathematica* 38(4) (2011), pp. 506–547. 28

[Goldstein 2009] Goldstein, Catherine : La théorie des nombres en France dans l'entre-deux-guerres : De quelques effets de la première guerre mondiale. Dans : *Revue d'histoire des sciences* 62(1) (2009), pp. 143. 99

[Gorn 1996] Gorn, Michael H. : Hugh L. Dryden's Career in Aviation and Space. Dans : *Monographs in Aerospace History* (1996). 139

[Grattan-Guinness 2002] Grattan-Guinness, Ivor : *Companion Encyclopedia of the History and Philosophy of the Mathematical Sciences*. Routledge, 2002. – 1796 p. 144

[Greenberg et Googstein 1983] Greenberg, John L. et Googstein, Judith R. : Theodore von Kármán and the arrival of applied mathematics in the United States, 1930-1940. Division of the Humanities and Social Sciences, California Institute of Technology, 1983. 4, 139, 251

[Grelon et Grossetti 1996] Grelon, Andrè et Grossetti, Michel : Villes et institutions scientifiques (Rapport pour le PIR-Villes). 1996. – CNRS/Région Midi-Pyrénées, 360 p. 93, 94

[Guienne 1940] Guienne, Paul : Qualification de la turbulence en soufflerie par le nombre de Reynolds critique d'une sphère ou d'un cylindre. Introduction de J. Kampé de Fériet. Dans : *Rapport technique du G.R.A numéro 3* (1940). xvi, 185, 187, 281

[Guilbaud 2008] Guilbaud, Alexandre : La "république des hydrodynamiciens " de 1738 jusqu'à la fin du 18e siècle. Dans : *Dix-huitième siècle* 40(1) (2008), pp. 173. 137, 315

[Guilbaud 2012] Guilbaud, Alexandre : À propos des relations entre savoirs théoriques et pratiques dans l'Encyclopédie : le cas du problème de la résistance des fluides et de ses applications. (47) (2012), pp. 207–242. 8, 137

[Haag 1921] Haag, Jules : Sur le calcul des trajectoires et de leurs altérations. Dans : *Journal de l'École Polytechnique* **2**(2) (1921), pp. 3–52. 46, 58

[Hadamard 1922] Hadamard, Jacques : Rapport sur les travaux examinés et retenus par la Commission de Balistique. Dans : *Mémorial de l'Artillerie française* **1**(1) (1922). 59

[Hadjadji Seddik-Ameur 2003] Hadjadji Seddik-Ameur, Nacira : Les tests de normalité de Lhoste. Dans : *Mathématiques et sciences humaines* (162) (2003). 73

[Hager 2016–10] Hager, Willi H. : SHF and Grenoble : La Houille Blanche, Beauvert Laboratory and Men. (5) (2016-10), pp. 57–63. 92

[Hahn et Hager 2003–08] Hahn, Pierre et Hager, Willi H. : Ernest-Paul Hahn, l'IEN et La SHF. Dans : *La Houille Blanche* (4) (2003-08), pp. 103–106. 92

[Hanle et Kármán 1982] Hanle, Paul A. et Kármán, Theodore V. : *Bringing Aerodynamics to America*. Mit Press, 1982. – 210 p. 139

[Heck 2005] Heck, André (Dir.) : *The Multinational History of Strasbourg Astronomical Observatory*. Dordrecht : Springer Netherlands, 2005. 22

[Higham 2015] Higham, Nicholas J. : *The Princeton Companion to Applied Mathematics*. Princeton University Press, 2015. – 1031 p. 2, 3, 312

[Hirschel et. al. 2012] Hirschel, Ernst H. ; Prem, Horst et Madelung, Gero : *Aeronautical Research in Germany : From Lilienthal until Today*. Springer Science & Business Media, 2012. – 728 p. 138, 196

[Idrac 1996] Idrac, Michel : La mècanique des fluides à Toulouse. Dans : Grelon, Andrè (Dir.) et Grossetti, Michel (Dir.) : *Villes et institutions scientifiques (Rapport pour le PIR-Villes)*. 1996. – CNRS/Région Midi-Pyrénées, 360 p. 93

[IUTAM 2016] IUTAM : Dans : Eberhard, Peter (Dir.) et Juhasz, Stephen (Dir.) : *IUTAM – A Short History*. Springer International Publishing, 2016. 252

[José et. al. 1940] José, Moyal ; Dedebant, Georges et Wehrlé, Philippe : Sur l'équivament hydrodynamique d'un corpuscule aléatoire. Dans : *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences* **210** (1940), pp. 332–334. 173

[Jouguet 1905] Jouguet, Émile : Sur la similitude dans le mouvement des fluides. Dans : *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences* **141** (1905), pp. 346–348. 61

[Kampé de Fériet 1915] Kampé de Fériet, Joseph : Sur les fonctions hypersphériques. Paris : Gauthier-Villars, 1915. – Thèse. 55

[Kampé de Fériet 1925] Kampé de Fériet, Joseph : Mesure de la vitesse des projectiles par enregistrement photographique sur plaque mobile. Dans : *Mémorial de l'Artillerie française* 4(2) (1925), pp. 289–303. xv, 69, 70

[Kampé de Fériet 1929a] Kampé de Fériet, Joseph : Sur la liaison entre l'absence de pressions négatives et le sens de la concavité des lignes de jet dans le mouvement plan d'un fluiide incompressible autour d'un obstacle. Dans : *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences* 188 (1929), pp. 230–232. 221, 222

[Kampé de Fériet 1929b] Kampé de Fériet, Joseph : Sur une condition nécessaire pour l'absence de pressions négatives dans un fluide parfait plan en mouvement permanent autour d'un obstacle. Dans : *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences* 188 (1929), pp. 47–49. 218, 220, 221, 222

[Kampé de Fériet 1930] Kampé de Fériet, Joseph : Sur quelques cas d'intégration des équations du mouvement plan d'un fluide visqueux incompressible. Dans : *Ann. Soc. Sc. Bruxelles* 50 (1930), pp. 77–80. 225, 226, 227, 228

[Kampé de Fériet 1931] Kampé de Fériet, Joseph : Sur une classe de mouvements plans d'un fluide visqueux incompressible. Dans : *Ann. Soc. Sc. Bruxelles* 51 (1931), pp. 7–11. 227, 228

[Kampé de Fériet 1932] Kampé de Fériet, Joseph : Détermination des mouvements plans d'un fluide visqueux incompressible où le tourbillon est constant le long des lignes de courant. Dans : *Verhandlungen des Internationalen Mathematiker Kongresses, Zurich* 2 (1932), pp. 298–300. 228

[Kampé de Fériet 1933] Kampé de Fériet, Joseph : Sur le mouvement permanent d'un liquide visqueux. Dans : *Ann. Soc. Sc. Bruxelles* 53 (1933), pp. 123–126. 228

[Kampé de Fériet 1934–1935] Kampé de Fériet, Joseph : L'état actuel du problème de la turbulence. Dans : *La Science aérienne* 3-4 (1934-1935), pp. 9–34, 12–52. 247, 248

[Kampé de Fériet 1936a] Kampé de Fériet, Joseph : La turbulence atmosphérique. Dans : *Journées techniques internationales de l'Aéronautique* (1936), pp. 431–467. 158, 194

[Kampé de Fériet 1936b] Kampé de Fériet, Joseph : L'aéronautique et l'école. Dans : *La Technique moderne* 28(22) (1936), pp. 3–7. 199

[Kampé de Fériet 1937a] Kampé de Fériet, Joseph : La turbulence atmosphérique. Dans : *Extrait des Actes de la Société Helvétique des Sciences Naturelles* (1937), pp. 25–41. 188, 189, 197

[Kampé de Fériet 1937b] Kampé de Fériet, Joseph : Les bases d'une mécanique de la turbulence. Dans : *Sciences* 16 (1937), pp. 372–382. 165, 167, 168

[Kampé de Fériet 1937c] Kampé de Fériet, Joseph : L'étude des courants aériens par l'enregistrement photographique des nuages. Dans : *Mitteilungsblatt* 5 (1937). 194, 196

[Kampé de Fériet 1937d] Kampé de Fériet, Joseph : Sur les équations de la diffusion thermique par turbulence. Dans : *Ann. Soc. Sc. Bruxelles* 57 (1937), pp. 67–72. 244

[Kampé de Fériet 1938] Kampé de Fériet, Joseph : Recherches sur la turbulence atmosphérique au centre national de vol sans moteur de la Banne d'Ordanche. Dans : *Mitteilungsblatt* 6 (1938). 196

[Kampé de Fériet 1939a] Kampé de Fériet, Joseph : Les fonctions aléatoires stationnaires et la théorie statistique de la turbulence homogène. Dans : *Ann. Soc. Sc. Bruxelles* 59 (1939), pp. 145–194. 236, 237, 238, 239, 242, 245, 246, 262, 264, 294

[Kampé de Fériet 1939b] Kampé de Fériet, Joseph : Some Recent Researches on Turbulence. Dans : *Proceedings of the Fifth International Congress for Applied Mechanics* (1939), pp. 352–355. xvi, 176, 180

[Kampé de Fériet 1939c] Kampé de Fériet, Joseph : Sur le spectre de la turbulence homogène. Dans : *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences* 208 (1939), pp. 722. 244

[Kampé de Fériet 1942] Kampé de Fériet, Joseph : Sur l'effacement de l'inversion de température après le lever du Soleil dans les couches basses de l'atmosphère. Dans : *La Météorologie* 40 (1942), pp. 137–149. 198, 259

[Kampé de Fériet 1945] Kampé de Fériet, Joseph : Hasard et probabilité dans la pensée scientifique contemporaine. 1945. 213, 267

[Kampé de Fériet 1948] Kampé de Fériet, Joseph : Le tenseur spectral de la turbulence homogène non isotrope dans un fluide incompressible. Dans : *VIIth International Congress Applied Mechanics, General Lecture London* (1948), pp. 626. 246

[Kampé de Fériet 1949a] Kampé de Fériet, Joseph : Sur un problème d'algèbre abstraite posé par la définition de la moyenne dans la théorie de la turbulence. Dans : *Ann. Soc. Sc. Bruxelles* 63 (1949), pp. 156–172. 249

[Kampé de Fériet 1949b] Kampé de Fériet, Joseph : *Turbulencia*. Instituto Nacional Esteban Terradas de Técnica Aeronautica, Madrid, 1949. 249

[Kampé de Fériet 1957] Kampé de Fériet, Joseph : Problèmes mathématiques de la théorie de la turbulence homogène. CIME, 1-10 settembre 1957, t. 1, 1957, pp. 1–104. 237

[Kampé de Fériet 1965] Kampé de Fériet, Joseph : Random integrals of differential equations. Dans : Saaty, T.-L (Dir.) : *Lectures on Modern Mathematics* Vol. 3. New York, 1965. 267

[Kampé de Fériet et. al. 1938] Kampé de Fériet, Joseph ; Martinot-Lagarde, André et Rollin, Georges : Sur un appareil permettant de déterminer le module et la direction de la vitesse dans un fluide. Dans : *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences* **207** (1938), pp. 772–774. 189

[Kampé de Fériet et. al. 1939] Kampé de Fériet, Joseph ; Martinot-Lagarde, André et Rollin, Georges : Etude sur l'utilisation des anémomètres dans un courant d'air. Dans : *Publications scientifiques et techniques du Ministère de l'air, Bulletin des services techniques* 156 (1939), pp. 52. 178, 188

[Kampé de Fériet et. al. 1941] Kampé de Fériet, Joseph ; Martinot-Lagarde, André et Rollin, Georges : L'anémoclinomètre I.M.F.L. et son trimanographe. Dans : *Rapport technique du G.R.A numéro 4* (1941). 189

[Kerisel 2001] Kerisel, Jean : *Albert Caquot 1881-1976 - Savant, soldat et bâtisseur*. Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées, 2001. 81

[Kolmogoroff 1933] Kolmogoroff, A. : *Grundbegriffe der Wahrscheinlichkeitsrechnung*. Springer Berlin Heidelberg, 1933. 236

[Konstantinos 2009] Konstantinos, Chatzis : Les ingénieurs français au XIXème siècle (1789 – 1914) – Émergence et construction d'une spécificité nationale. Dans : *Bulletin de la Sabix. Société des amis de la Bibliothèque et de l'Histoire de l'École polytechnique* (44) (2009), pp. 53–63. 3, 28

[Lamy 2013] Lamy, Jérôme : Transfert de concept et cumulation théorique. Pour un dialogue entre histoire et histoire des sciences : l'étude de l'observatoire de Toulouse aux xviiie et xixe siecles. Dans : Rey, Anne-Lise (Dir.) : *Méthode et Histoire. : Quelle histoire font les historiens des sciences et des techniques ?* Paris, Classiques Garnier, Histoire et Philosophie des sciences, 2013, pp. 445–458. 15

[Langevin 1934] Langevin, Paul : *Notice sur les travaux scientifiques de M. Paul Langevin*. Paris : Société générale d'imprimerie et d'édition, 1934. 63

[Lehto 1998] Lehto, Olli : *Mathematics Without Borders*. New York, NY : Springer New York, 1998. 89

[Lelong 2002–01–01] Lelong, Benoit : Paul Langevin et la détection sous-marine, 1914-1929. Un physicien acteur de l'innovation industrielle et militaire. Dans : *épistémologiques* 2 (2002-01-01), pp. 205–232. 62

[Leloup 2009] Leloup, Juliette : *L'entre-deux-guerres mathématique à travers les thèses soutenues en France*. Paris : Institut Mathématique de Jussieu, 2009. 6, 22, 23, 217, 218, 268, 306

[Leonard et Peters 2011] Leonard, A. et Peters, N. : Theodore von Kármán. Dans : Davidson, Peter A. (Dir.) ; Kaneda, Yukio (Dir.) ; Moffatt, Keith (Dir.) et Sreenivasan, Katepalli R. (Dir.) : *A Voyage Through Turbulence*. Cambridge University Press, 2011, pp. 101–126. 154

[Locker 2001] Locker, Bernard : *Paul Lévy : la période de guerre : Intégrale stochastiques et mouvement brownien*, Thèse de Doctorat, 2001. – Thèse de doctorat dirigée par Bru, Bernard Sciences de la vie et de la matière. Histoire des mathématiques Paris 5. 236, 242, 272

[Loriga 1996] Loriga, Sabina : La biographie comme problème. Dans : Revel, Jacques (Dir.) : *Jeux d'échelles*. Paris, ehess, Gallimard- Seuil, 1996. 14

[Love et. al. 1912–1914] Love, A. E. H. ; Appell, P. ; Villat, H. et Beghin, H. : Hydrodynamique et développements concernant l'hydrodynamique (à suivre). Dans : *Encyclopedie de sciences mathématiques pures et appliquées*. Editions Jacques Gabay, 1912-1914. – Tome IV Mécanique, volume 5. 89

[Lévy 1944] Lévy, Paul : Dérivation, intégration et équations différentielles stochastiques. Dans : *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences* 219 (1944), pp. 602–603. 241

[Martinot-Lagarde 1934] Martinot-Lagarde, André : Sur un anémomètre peu sensible au changement de direction du vent. Dans : *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences* **198** (1934), pp. 338–339. 188

[Martinot-Lagarde 1968] Martinot-Lagarde, André : L'institut de mècanique des fluides de Lille. 1968, pp. 188–124. 299

[Martinot-Lagarde et. al. 1952] Martinot-Lagarde, André ; Fauquet, André et Frenkiel, Naftali : The IMFL anemoclinometer. An instrument for the investigation of a fluctuating velocity vector. 1952, pp. 661–666. xvi, 189, 193

[Maugin 2017] Maugin, Gérard A. : Paul Germain et la mécanique des fluides (1945–1970). Dans : *Comptes Rendus Mécanique* 345(9) (2017), pp. 605 – 612. 314

[Mazliak 2006] Mazliak, Laurent : Le printemps ergodique. 2006. – Note du cours ENS, 6 et 13 décembre 2006. 108

[Mazliak 2007] Mazliak, Laurent : On the exchanges between W. Doeblin and B. Hostinský. Dans : *Revue d'histoire des mathématiques* 13 (2007), pp. 155–180. 236

[Mazliak 2010] Mazliak, Laurent : Borel, Fréchet, Darmois : la découverte des statistiques par les probabilistes français. Dans : *J. Electron. Hist. Probab. Stat.* **6**(2) (2010). 23, 236

[Mazliak 2012] Mazliak, Laurent : A Study of a Trajectory : Popoff, Wars and Ballistics. Dans : *Almagest* 3(1) (2012), pp. 1–20. 58

[Mazliak 8 mars 2010] Mazliak, Laurent : La mission strasbourgeoise de Maurice Fréchet. 8 mars 2010. – http://images.math.cnrs.fr/La-mission-strasbourgeoise-de-Maurice-Frechet.html. 22

[Mazliak et Catellier 2012] Mazliak, Laurent et Catellier, Rémi : The emergence of French probabilistic statistics. Borel and the Institut Henri Poincaré around the 1920s. Dans : *Revue d'histoire des mathématiques* 18 (2012), pp. 271–335. 236

[Mazliak et Shafer 2011] Mazliak, Laurent et Shafer, Glenn : Publier sous l'Occupation I. Autour du cas de Jacques Feldbau à l'Académie des sciences. Dans : *Science in Context* 24(4) (2011), pp. 587–623. 272

[Mazliak et Tazzioli 2009] Mazliak, Laurent et Tazzioli, Rossana : *Archimedes*. Vol. 22 : *Mathematicians at War*. Springer Netherlands, 2009. 22

[Mazliak et Tazzioli 2014] Mazliak, Laurent et Tazzioli, Rossana : Italian mathematicians and the First World War : Intellectual debates and institutional innovations. Dans : Aubin, David (Dir.) et Catherine, Goldstein (Dir.) : *The war of guns and mathematics*, Vol. 42. Amer. Math. Soc., Providence, RI, 2014, pp. 181–227. 29

[Millionschikov 1939] Millionschikov, M. D. : ecay of homogeneous isotropic turbulence in a viscous incompressible fluid. Dans : *Dokl. Akad. Nauk SSSR* 22 (1939), pp. 236. 239

[Moraux 1943] Moraux, P. : Comparaison de la turbulence des souffleries par mesure de traînée de sphère avec un dynamomètre enregistreur à faible temps de réponse. Dans : *Rapport technique du G.R.A numéro 3* (1943). xvi, 284, 286

[Morrell 1972] Morrell, John B. : The Chemist Breeders : The Research Schools of Liebig and Thomas Thomson. Dans : *Ambix* 19 (1972), pp. 1–46. 160

[Mounier-Kuhn 1996] Mounier-Kuhn, Pierre E. : Un programme technologique national : la mécanique des fluides. Dans : Grelon, Andrè (Dir.) et Grossetti, Michel (Dir.) : *Villes et institutions scientifiques (Rapport pour le PIR-Villes)*. 1996. – CNRS/Région Midi-Pyrénées, 360 p. 8, 80, 102

[Mounier-Kuhn 2010] Mounier-Kuhn, Pierre E. : *Histoire de l'informatique en France*. Paris : Presses Universite Paris-Sorbonne, 2010. 45, 80, 114

[Murad 2001] Murad, S. T. : Bachelier et son époque : une conversation avec Bernard Bru. Dans : *Journal de la société française de statistique* 142 (2001), pp. 3–40. 107

[Nastasi 2015] Nastasi, Pietro : Un matematico alla Grande Guerra : Mauro Picone. Dans : *Lettera Matematica Pristem* 2015(92) (2015), pp. 17–25. 59

[Nastasi et Tazzioli 2006] Nastasi, Pietro et Tazzioli, Rossana : Problems of method in Levi-Cvita's contributions to hydrodynamics. Dans : *Revue d'histoire des mathèmatiques* 12 (2006), pp. 81–118. 88

[Nieuwstadt et Steketee 2012–12–06] Nieuwstadt, F. T. et Steketee, J. A. : *Selected Papers of J. M. Burgers*. Springer Science and Business Media, 2012-12-06. – 761 p. 140, 215

[Obukhov 1941] Obukhov, Alexander : On the spectral energy distribution in a turbulent flow. Dans : *Izv. Akad. Nauk SSSR, Ser. Geogr. Geofiz.* 5 (1941), pp. 453–466. 239

[Parshall 1999] Parshall, Karen H. : Telling the Life of a Mathematician : The Case of J.J. Sylvester. Dans : *Revue d'histoire des mathématiques* 5 (1999), pp. 285–302. 13

[Parshall 2004] Parshall, Karen H. : Defining a Mathematical Research School : The Case of Algebra at the University of Chicago, 1892–1945. Dans : *Historia Mathematica* 31(3) (2004), pp. 263–278. 160

[Parshall et Rice 2002] Parshall, Karen H. et Rice, Adrian C. : *Mathematics Unbound : The Evolution of an International Mathematical Research Community, 1800-1945*. American Mathematical Soc., 2002. – 432 p. 252

[Parshall et Rowe 1994] Parshall, Karen H. et Rowe, David E. : *The Emergence of the American Mathematical Research Community, 1876-1900 : J.J. Sylvester, Felix Klein, and E.H. Moore*. American Mathematical Soc., 1994. – 532 p. 252

[Patard 1930] Patard, Léon : *Historique de la Commission d'expérience de Gâvre*. Paris : Imprimerie nationale, 1930. xv, 30, 33, 34, 37, 72

[Pestre 2004] Pestre, Dominique : *Les sciences pour la guerre : 1940-1960*. Paris : Éditions de l'École des Hautes Etudes en Sciences Sociales, 2004. 89, 252, 253

[Pestre et Bonneuil 2015] Pestre, Dominique et Bonneuil, Christophe : *Histoire des sciences et des savoirs, t. 3. Le siècle des technosciences : Le siècle des technosciences*. Le Seuil, 2015. – 673 p. 2, 7

[Picard 1887] Picard, Emile : Sur les équations différentielles linéaires et les groupes algébriques de transformations. Dans : *Annales de la faculté des sciences de Toulouse* **1** (1887), pp. A–A15. 47

[Pierrard 1967] Pierrard, Pierre : *Lille et les Lillois -Essai d'histoire collective contemporaine (de 1815 à nos jours)*. Editions Bloud & Gay, 1967. – pp. 325. 98

[von Plato 1998] Plato, Jan von : *Creating Modern Probability : Its Mathematics, Physics and Philosophy in Historical Perspective*. Cambridge University Press, 1998. – 256 p. 235

[Popoff 1925] Popoff, Kyrille : *Les méthodes d'intégration de Poincaré et le problème général de la balistique extérieure. Leçons faites à la Sorbonne pendant l'année scolaire 1924-1925.* Paris : Imprimerie Nationale et Gauthier-Villars, 1925. 58

[Pourprix 2009] Pourprix, Marie-Thérèse : *Des mathématiciens à la Faculté des sciences de Lille, 1854-1971*. L'Harmattan, 2009. – Google-Books-ID : hNCYs5DVohAC. 98

[Reinbothe 2010–11–08] Reinbothe, Roswitha : L'exclusion des scientifiques allemands et de la langue allemande des congrès scientifiques internationaux après la Première Guerre mondiale. Dans : *Revue germanique internationale* (12) (2010-11-08), pp. 193–208. 89

[Revel et des hautes études en sciences sociales 1996] Revel, Jacques et sociales, Ecole des hautes études en sciences : *Jeux d'échelles : la micro-analyse à l'expérience*. Gallimard, 1996. – 262 p. 16, 308

[Rollet et Nabonnand 2014] Rollet, Laurent et Nabonnand, Philippe : Mathematics and Mathematicians in Nancy during World War I. Dans : Aubin, Catherine Goldstein & D. (Dir.) : *A War of Guns and Mathematics, Mathematics and Mathematicians around WW1*. London Mathematical Society/American Mathematical Society, 2014, pp. 351–369. 93

[Rollet et Philippe 2012] Rollet, Laurent et Philippe, Nabonnand : Définir, classer, compter : biographie et prosopographie en histoire des sciences. Dans : Rollet, Laurent (Dir.) et Philippe, Nabonnand (Dir.) : *Les uns et les autres...*

Biographies et prosopographies en histoire des sciences. Presses Universitaires de Lorraine, 2012, pp. 11–28. 13

[Rosenblatt 1935] Rosenblatt, A. : Solutions exactes des équations du mouvement des liquides visqueux. Dans : *Memorial des Sciences Mathematiques :* 72 (1935). 224, 225

[Roussel 1989] Roussel, Yves : L'histoire d'une politique des inventions (18871918). Dans : *Cahiers pour l'histoire du CNRS* **3** (1989), pp. 19–57. 28

[Rowe 1989] Rowe, D. E. : Klein, Hilbert, and the Gottingen mathematical tradition. Dans : *Osiris* 5 (1989), pp. 186–213. 3, 138, 212

[Roy 1925] Roy, Maurice : l'état actuel de nos connaissances théoriques concernant la résistance de l'air. Dans : *Mémorial de l'Artillerie française* **1** (1925), pp. 23–43. 61

[Roy 2012] Roy, Sophie : *125 ans à l'ombre de la tour Eiffel*. Saint-Mandé, France, Météo-France,, 2012. – 166 p. 156

[Schiavon 2014] Schiavon, Martina : *Itinéraires de la précision : géodésiens, artilleurs, savants et fabricants d'instruments de précision en France : 1870-1930*. PUN-Éditions universitaires de Lorraine, 2014. 37, 40, 65

[Schwartz 1988] Schwartz, Laurent : Quelques réflexions et souvenirs sur Paul Lévy, Colloque Paul Lévy sur les processus stochastiques (22-26 juin 1987, École polytechnique, Palaiseau). 1988, pp. 13–28. 264

[Segal 2002] Segal, Sanford L. : War, refugees, and the creation of an international mathematical community. Dans : Parshall, Karen H. (Dir.) et C., Rice A. (Dir.) : *Mathematics Unbound : The Emergence of an International Mathematical Research Community,*. American Mathematical Society, Providence, RI,, 2002. 139, 251

[Servos 1993] Servos, G : Research schools and their histories. Dans : Geison, G. (Dir.) et Holmes, F. (Dir.) : *Research Schools : Historical Reappraisals*. Osiris, vol. 8, 1993, pp. 3–15. 160

[Siacci 1901] Siacci, Francesco : Sur un problème de d'Alembert. Dans : *CRAS* **132** (1901), pp. 1175–1178. 46

[Siegmund-Schultze 2000] Siegmund-Schultze, Reinhard : An autobiographical document (1953) by Jean Leray on his time as rector of the "université en captivité" and prisoner of war in Austria. Dans : *Jean Leray* Vol. 84. numéro spécial de la Gazette des mathématiciens, 2000, pp. 11–15. 272

[Siegmund-Schultze 2003a] Siegmund-Schultze, Reinhard : The Late Arrival of Academic Applied Mathematics in the United States : A Paradox, Theses, and Literature. Dans : *NTM International Journal of History and Ethics of Natural Sciences, Technology and Medicine* 11(2) (2003), pp. 116–127. 139

[Siegmund-Schultze 2003b] Siegmund-Schultze, Reinhard : Military Work in Mathematics 1914–1945 : an Attempt at an International Perspective. Dans : Booss-Bavnbek, Bernhelm (Dir.) et Høyrup, Jens (Dir.) : *Mathematics and War*. Basel : Birkhäuser Basel, Springer Basel AG, 2003, pp. 23–82. 9, 10, 141, 303

[Siegmund-Schultze 2009a] Siegmund-Schultze, Reinhard : The Institute Henri Poincaré and Mathematics in France between the Wars. Dans : *Revue d'histoire des sciences* Tome 62(1) (2009), pp. 247–283. 6, 22, 73

[Siegmund-Schultze 2009b] Siegmund-Schultze, Reinhard : *Mathematicians Fleeing from Nazi Germany : Individual Fates and Global Impact*. Princeton University Press, 2009. 272

[Sreenivasan 2011] Sreenivasan, K.R : G.I. Taylor : the inspiration behind the Cambridge school. Dans : Davidson, Peter A. (Dir.) ; Kaneda, Yukio (Dir.) ; Moffatt, Keith (Dir.) et Sreenivasan, Katepalli R. (Dir.) : *A Voyage Through Turbulence*. Cambridge University Press, 2011, pp. 127–186. 139

[Strasser 2002] Strasser, Bruno J. : Totems de laboratoires, microscopes électroniques et réseaux scientifiques : L'émergence de la biologie moléculaire à Genève (1945-1960) / Laboratory totems, electron microscopes, and scientific networks : The emergence of molecular biology in Geneva (1945-1960). Dans : *Revue d'histoire des sciences* 55(1) (2002), pp. 5–44. 315

[Sugot 1918] Sugot, Georges : *Cours de balistique : École d'application de l'artillerie navale*. Paris : Imprimerie nationale, 1918. 36

[Sugot 1928] Sugot, Georges : Balistique extérieure théorique. Dans : *Mémorial de l'Artillerie française* **2** (1928), pp. 827–920. 45

[Tanzi Cattabianchi 1977] Tanzi Cattabianchi, Luigi : I contribut di Mauro Picone alla balistica razionale. Dans : *Rivista matematica dell'Università di Parma* **3** (1977), pp. 357–389. 59

[Tanzi Cattabianchi 1981] Tanzi Cattabianchi, Luigi : I contribut di Guido Fubini e Francesco Severi ad alcuni problemi di balistica esterna. Dans : *Atti dell'Academia delle Scienze di Torino* **115** Suppl. (1981), pp. 217–233. 60

[Taylor 1935] Taylor, G. I. : Statistical Theory of Turbulence. Dans : *Proceedings of the Royal Society A : Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 151(873) (1935), pp. 421–444. 151, 183, 244

[Taylor 1938] Taylor, G. I. : The Spectrum of Turbulence. Dans : *Proceedings of the Royal Society A : Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 164(919) (1938), pp. 476–490. xvi, 152, 155, 244

[Taylor 1922] Taylor, Geoffrey I. : Diffusion by Continuous Movements. Dans : *Proceedings of the London Mathematical Society* s2-20(1) (1922), pp. 196–212. 149, 176, 242, 244

[Tazzioli 2016] Tazzioli, Rossana : The eyes of French mathematicians on Levi-Civita's work - the case of hydrodynamics. Dans : Brechenmacher, Frédéric (Dir.) ; Jouve, Guillaume (Dir.) ; Mazliak, Laurent (Dir.) et Tazzioli, Rossana (Dir.) : *Images of Italian Mathematics in France : The Latin Sisters, from Risorgimento to Fascism*. Birkhäuser, 2016, pp. 255–288. 8, 87, 88, 206, 207, 217, 219

[Tazzioli 2017–07] Tazzioli, Rossana : D'Alembert's Paradox, 1900–1914 : Levi-Civita and His Italian and French Followers. Dans : *Comptes Rendus Mécanique* 345(7) (2017-07), pp. 488–497. 8, 88

[Tournès 2003] Tournès, Dominique : Du compas aux intégraphes : les instruments du calcul graphique. Dans : *Repères-IREM* **50** (2003), pp. 63–84. 44

[Tournès 2003–11] Tournès, Dominique : L'intégration graphique des équations différentielles ordinaires. Dans : *Historia Mathematica* 30(4) (2003-11), pp. 457–493. 44

[Tournès 2007] Tournès, Dominique : Les Méthodes Graphiques Dans l'histoire et Dans l'enseignement. Dans : Dominique Bénard Évelyne Barbin et (Dir.) : *Histoire et Enseignement Des Mathématiques. Rigueurs, Erreurs, Raisonnements*. INRP et Université Blaise-Pascal, 2007, pp. 263–285. 44

[Tournès 2011] Tournès, Dominique : Une discipline à la croisée de savoirs et d'intérêts multiples : la nomographie. Dans : Ageron, P. (Dir.) et Barbin, É. (Dir.) : *Circulation Transmission Héritag*. Université de Caen-Basse-Normandie, 2011, pp. 415–448. 44

[Tournès 2012] Tournès, Dominique : Mathematics of the 19th century engineers : methods and instruments, in Proceedings of History and Pedagogy of Mathematics 2012. Daejeon : KSME, 2012, pp. 381–393. 3, 28, 41

[Juvanon du Vachat 1995] Vachat, Régis Juvanon du : La Mécanique Des Fluides Turbulents Avec Dedebant et Wehrlé à l'office National Météorologique (1934-1939). Dans : *La Météorologie* 8 (1995), pp. 156. 156, 159, 201, 202

[Vagner 1937] Vagner, Jean : Étude par l'enregistrement photographique du mouvement accéléré d'une sphère tombant en chute libre dans un liquide visqueux. Université Lille1 - Sciences et Technologies, 1937. – Thèse. xv, 70, 72, 76

[Videira et Marta 2013] Videira, Antonio A. et Marta, De A. : Le rôle de la biographie dans l'histoire des sciences. Dans : Rey, Anne-Lise (Dir.) : *Méthode et Histoire. : Quelle histoire font les historiens des sciences et des techniques ?* Paris, Classiques Garnier, Histoire et Philosophie des sciences, 2013, pp. 321–335. 13

[Villat 1911] Villat, Henri : Sur la résistance des fluides. Dans : *Annales scientifiques de l'École normale supérieure* (1911), pp. 203–311. 206, 219, 220

[Villat 1914] Villat, Henri : Sur la validité de certins problèmes d'Hydrodynamique. Dans : *Journal des Mathématiques Pures et Appliquées* (1914), pp. 231–290. xvi, 219, 220

[Villat 1929a] Villat, Henri : *Leçons sur l'hydrodynamique*. Gauthier-Villars, Paris, 1929. – 296 p. 225

[Villat 1929b] Villat, Henri : A propos du signe des pressions dans un fluide parfait. Dans : *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences* 188 (1929), pp. 49. 221

[Villat 1931] Villat, Henri : Notice sur la vie et l'oeuvre de Jules Drach (1871-1949). 1931. – déposée en la séance du 2 juillet 1951, Institut de France, Académie des sciences. 47

[Villat 1943] Villat, Henri : *Leçons sur les fluides visqueux*. Gauthier-Villars, Paris, 1943. – 540 p. 225

[von Kármán 1943] von Kármán, Theodore : Tooling up Mathematics for Engineering. Dans : *Quarterly of Applied Mathematics* 1(1) (1943), pp. 2–6. 210, 211

[von Kármán et Leslie 1938] von Kármán, Theodore et Leslie, Howarth : On the Statistical Theory of Isotropic Turbulence. Dans : *Proceedings of the London Mathematical Society* 164(A) (1938), pp. 192–215. 153, 154, 246

[Weber 2008] Weber, Jean-Marc : Un demi-siècle d'aéronautique en France. Études et recherches. 2008. – Comité pour l'Histoire de l'Aéronautique. Centre des hautes études de l'armement, Paris. 80, 82, 96

[Wehrlé 1956] Wehrlé, Philippe : *L'univers aléatoire*. Éditions du Griffon, 1956. – 472 p. 161, 172, 200, 202

[Wendling 1938] Wendling, André : L'ingénieur et l'enseignement technique français. Dans : *Mémorial de l'Artillerie française* **4** (1938), pp. 921–935. 40

[Wesfreid 2006] Wesfreid, José E. : Scientific biography of Henri Bénard (1874-1939). Dans : Mutabazi, I (Dir.) ; Wesfreid, J.E. (Dir.) et Guyon, E. (Dir.) : *Dynamics of Spatio-Temporal Cellular Structures : Henri Bénard Centenary Review*. 2006, pp. 9–37. 114, 158, 159

[Yaglom 1994–01] Yaglom, A M. : A. N. Kolmogorov as a Fluid Mechanician and Founder of a School in Turbulence Research. Dans : *Annual Review of Fluid Mechanics* 26(1) (1994-01), pp. 1–23. 239

[Zack et Landry 2016] Zack, Maria et Landry, Elaine : *Research in History and Philosophy of Mathematics : The CSHPM 2015 Annual Meeting in Washington,*. Birkhauser, 2016. – 256 p. 252