



INSTITUT DE FRANCE
Académie des sciences

Comptes Rendus

Mécanique

François Charru

La mécanique des fluides en France dans la première moitié du xx^e siècle

Volume 351, Numéro spécial S3 (2023), p. 3-41

En ligne depuis le 16 novembre 2023

Numéro publié le 26 août 2024

Numéro spécial : L'année de la mécanique : quelques points de vue sur des avancées récentes en mécanique des solides et des fluides

Rédacteurs en chef invités : Francisco Chinesta (PIMM, UMR CNRS 8006, Arts et Métiers Institute of Technology, Paris, France) et Aziz Hamdouni (LaSIE, UMR CNRS 7356, La Rochelle Université, France)

<https://doi.org/10.5802/crmeca.203>

Cet article est publié sous la license
CREATIVE COMMONS ATTRIBUTION 4.0 INTERNATIONAL.
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Les Comptes Rendus. Mécanique sont membres du
Centre Mersenne pour l'édition scientifique ouverte
www.centre-mersenne.org — e-ISSN : 1873-7234



Article de recherche / Research article

L'année de la mécanique : quelques points de vue sur des avancées récentes en mécanique des solides et des fluides / *The French "Année de la Mécanique": some views on recent advances in solid and fluid mechanics*

La mécanique des fluides en France dans la première moitié du xx^e siècle

Fluid mechanics in France in the first half of the 20th century

François Charru ^{*,a}

^a Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse – CNRS-Université de Toulouse –
31400 Toulouse, France

Courriel: francois.charru@imft.fr

Résumé. Les mécaniciens des fluides français de la première moitié du vingtième siècle, contrairement à leurs illustres prédecesseurs, apparaissent peu cités dans les bibliographies des ouvrages et revues de synthèse. Les contributions françaises aux deux questions majeures et les plus débattues de la période, la couche limite et la turbulence semblent très modestes. Cette impression de retrait ne rend pas justice aux travaux alors réalisés en France par des personnalités scientifiques de premier plan, travaux rapportés dans des thèses de doctorat, publications et correspondances aujourd'hui oubliées mais conservées dans les bibliothèques et les archives. Elle n'explique pas non plus le rôle déterminant joué par la France dans la création, en 1946 à Paris, de l'Union internationale de mécanique théorique et appliquée (IUTAM). L'objet de cet article est de rendre compte des plus remarquables de ces travaux, de les situer dans leur contexte national et international – marqué par deux guerres mondiales et par l'internationalisation de la discipline – et de rappeler le rôle majeur qu'y a joué le ministère de l'Air. Les institutions créées par ce dernier dans les facultés des sciences auront structuré la mécanique des fluides française et préparé la place de premier plan que celle-ci jouera, au niveau international, dans la seconde moitié du siècle.

Abstract. French fluid mechanicians of the first half of the Twentieth Century, unlike their illustrious predecessors, appear scarcely mentioned in textbooks and reviews. In particular, French contributions to the boundary layer and turbulence theories – major breakthroughs of the period – seem quite modest. However, contemporary PhD theses, journals and correspondence reveal remarkable works undertaken by outstanding personalities. From 1929, a key instigator of these achievements was the Air Ministry, which, with great open-mindedness, created and financed four institutes of fluid mechanics and five teaching centers in faculties of science. This reveals a fruitful interwar period, which prepares the prominent role played by France in the creation in 1946 of the International Union of Theoretical and Applied Mechanics (IUTAM). This paper recounts this story, with attention paid to the connection between scientific questions and social and cultural issues, in a period marked by two world wars and great strengthening of international relationships.

* Auteur correspondant

Mots-clés. mécanique des fluides, histoire, vingtième siècle, France, aéronautique.

Keywords. fluid mechanics, history, twentieth century, France, aeronautics.

Manuscrit reçu le 1^{er} septembre 2022, accepté le 20 juin 2023.

1. Introduction

La première moitié du xx^e siècle est une période d'avancées majeures pour la mécanique des fluides, notamment avec les théories de la portance et de la couche limite, et la modélisation statistique de la turbulence. Un rapprochement s'opère ainsi entre l'hydrodynamique des théoriciens et l'hydraulique des ingénieurs, dans le contexte stimulant du développement de l'aéronautique. Ces avancées sont réalisées pour une large part en Allemagne et en Angleterre, dans les centres très créatifs de Göttingen et de Cambridge, puis aux États-Unis à partir des années trente. La France, qui avait tant brillé au siècle précédent, de Navier à Boussinesq, semble alors en retrait comme en témoigne le faible nombre de travaux français cités dans les revues de synthèse, celles par exemple de Hugh Dryden en 1955 et de Sydney Goldstein en 1969 [44, 45], ou dans les panoramas historiques de Davidson *et al.* et de Bloor [46, 47].

Cette impression de retrait que laissent les bibliographies ne rend cependant pas justice aux travaux remarquables alors réalisés en France par des personnalités scientifiques de premier plan, travaux dont témoignent des publications aujourd'hui oubliées dans les bibliothèques et les correspondances internationales conservées dans les archives. L'objet de cet article est de rendre compte des plus marquants de ces travaux – sans prétendre les avoir tous repérés –, de les situer dans leur contexte national et international (marqué par deux guerres mondiales), et de rappeler le rôle majeur qu'y a joué le ministère de l'Air créé en 1928. La vitalité de la mécanique des fluides française de l'entre-deux-guerres se manifestera après la Seconde Guerre mondiale notamment par le rôle important que joueront les mécaniciens dans la croissance du jeune CNRS, dans la création de l'ONERA, et dans la création de l'Union internationale de la mécanique théorique et appliquée (IUTAM).

La section suivante (§ 2) situe l'organisation des universités françaises au tournant du xx^e siècle et l'introduction dans ces universités de la mécanique des fluides, dans le contexte déterminant de l'essor de l'aéronautique. On présente ensuite les grandes questions de mécanique des fluides alors en débat (§ 3) puis les contributions françaises avant 1930 (§ 4). Les sections suivantes sont consacrées aux quatre instituts de mécanique des fluides créés dans les facultés des sciences en 1929 et 1930 à l'instigation du ministère de l'Air (§ 5-8) et aux centres annexes d'enseignement créés dans cinq autres facultés (§ 9) – auxquels on a ajouté le foyer émergeant de Grenoble. On termine par une discussion de la situation de la mécanique des fluides française au seuil des années soixante (§ 10). Des compléments à cette histoire ainsi que les références complètes seront trouvés dans un ouvrage récent de l'auteur [48].

2. La mécanique des fluides en France au tournant du xx^e siècle

2.1. *Organisation de l'université française*

Au début du xx^e siècle, les quinze universités françaises créées par la Troisième République sont des groupements de facultés (droit, médecine, sciences et lettres) elles-mêmes structurées autour de chaires professorales [49]. Les chaires, définies par une discipline académique, ont pour mission d'assurer l'enseignement supérieur et la diffusion du savoir vers le grand public, et de mener – avec de très faibles moyens – quelques travaux de recherche. Le « laboratoire » associé

à la chaire est en général le lieu des travaux pratiques des étudiants. La recherche proprement dite est l'apanage de quelques institutions essentiellement parisiennes comme l'École normale supérieure, le Muséum national d'histoire naturelle, ou l'École pratique des hautes études. Quelques laboratoires de province ont cependant une renommée internationale, tel celui de Pierre Weiss sur le magnétisme à Strasbourg, ou celui de Paul Sabatier sur la chimie catalytique à Toulouse.

Les facultés des sciences des universités régionales, loin de se tenir isolées dans des tours d'ivoire, montrent alors un fort intérêt pour les sciences appliquées dans une perspective d'utilité sociale – la Sorbonne se montrant quant à elle plus soucieuse d'une science « pure et désintéressée » dégagée des contingences [50–52]. Cet intérêt se manifeste en particulier par la création de nombreux instituts techniques (électrotechnique, chimie, agriculture, etc.) avec le concours actif des municipalités, des conseils départementaux et des chambres de commerce. Une idée alors largement partagée est en effet que le progrès scientifique et technique est une condition du progrès économique et social, lequel est même susceptible d'entraîner un progrès moral. L'industrie de son côté reste en retrait : elle manifeste peu d'intérêt pour la recherche scientifique et considère que la meilleure formation des ingénieurs reste celle que l'on acquiert « sur le tas », au sein de l'usine, par l'expérience du métier.

2.2. *Essor de l'aviation et premières initiatives universitaires*

Un événement majeur des premières années du siècle est la naissance de l'aviation, marquée notamment par les envols des frères Wright aux États-Unis et par celui d'Henri Farman en France. En janvier 1908, ce dernier accomplit le premier vol en boucle fermée, remportant ainsi le prix offert par Henry Deutsch de la Meurthe, industriel du pétrole et fondateur de l'Aéroclub de France (figure 1). Theodore von Kármán, jeune ingénieur hongrois et future figure majeure de la mécanique, assiste alors à son premier vol [53, p. 347]. Quelques mois plus tard, à l'occasion d'une tournée en France des frères Wright, le mathématicien Paul Painlevé (1863-1933), membre de l'Académie des Sciences, effectue son baptême de l'air. Enthousiasmé, et bientôt engagé dans une riche carrière politique, Painlevé sera un ardent prosélyte de l'aéronautique dans les milieux ministériels et parlementaires [54].

L'entrée de la mécanique des fluides dans l'enseignement supérieur est le fait d'initiatives privées, par le biais de l'aéronautique. C'est ainsi que Jean-Baptiste Roche, colonel à la retraite, fonde en 1909 l'École supérieure d'aéronautique et des constructions mécaniques (future Sup'Aéro devenue ISAE). Basil Zaharoff, marchand d'armes cosmopolite et magnat du pétrole, fonde l'année suivante une chaire d'Aviation à la Sorbonne. Lucien Marchis, physicien et collaborateur de Pierre Duhem à Bordeaux, en est nommé titulaire et organise le premier certificat de technique aéronautique. Henry Deutsch de la Meurthe fonde de son côté un institut aérotechnique (IAT) à Saint-Cyr-l'École (à l'ouest de Paris), rattaché à la Sorbonne. La direction de cet institut est attribuée au physicien Charles Maurain assisté par Albert Toussaint, ingénieur de l'École centrale de Paris. L'IAT est notamment équipé d'une voie ferrée sur laquelle sont réalisés des essais de profils d'aile instrumentés par des tubes de Pitot et montés sur des balances aérodynamiques. Toussaint y reproduit après la Première Guerre mondiale les essais réalisés à Göttingen, essais dont il a obtenu les rapports (les *Technische Berichte*) au titre des réparations de guerre. Au-delà de son activité scientifique et technique, l'IAT de Maurain est alors un lieu de rencontre entre savants, gens de lettres et hommes politiques, que font revivre les mémoires de Camille Marbo romancière et épouse du mathématicien Émile Borel [55].

L'aviation, qui dans ses premières années est un sport dangereux ou un loisir coûteux, démontre son importance militaire lors de la Première Guerre mondiale. La paix revenue, se pose



FIGURE 1. Henry Farman franchit la ligne d'arrivée du premier vol français en boucle fermée, le 13 janvier 1908, au-dessus du terrain de manœuvres d'Issy-les-Moulineaux. *L'Aérophile*, fonds Gallica.

la question de sa reconversion en activité civile, question à l'origine de la création d'un sous-secrétariat d'État à l'Aéronautique et au Transport aérien. Avec le soutien de Painlevé, ce secrétariat fonde en 1923, à la Sorbonne, une chaire de Mécanique des fluides et Applications. Painlevé lui-même en devient titulaire, assisté par Albert Métral, maître de conférences, et par Dimitri Ria-bouchinsky, fondateur en 1904 d'un institut aérotechnique près de Moscou avant son émigration en France.

Ces initiatives témoignent d'une reprise en main par l'État, dans les années vingt, du secteur aéronautique. Elles n'enrayent cependant pas un net déclin de l'aviation française, lié à la difficulté pour les glorieux pionniers à structurer leur activité d'inventeur-constructeur en véritable industrie. Dans un rapport établi à la demande du Conseil national économique, Raoul Dautry, ingénieur des Ponts et Chaussées, dresse un état alarmant de la situation [56]. Une nouvelle et vigoureuse stratégie est nécessaire, ce sera la mission d'un nouveau ministère de l'Air.

2.3. *Le ministère de l'Air et son programme pour la mécanique des fluides*

Le ministère de l'Air créé en 1928 est doté d'une puissante Direction générale technique, confiée à un polytechnicien énergique et visionnaire, Albert Caquot (1881-1976). Celui-ci a dirigé pendant la guerre la Section technique de l'Aéronautique militaire après s'être distingué pour son invention d'aérostats (ballons d'observation attachés au sol) très stables dans le vent [57]. Engagé ensuite dans une carrière d'ingénieur dans le génie civil, il est devenu un spécialiste des ouvrages en béton armé. Caquot sera élu à l'Académie des Sciences en 1934.

Le programme de Caquot au ministère de l'Air, ambitieux, vise plusieurs objectifs : concentrer et rationaliser l'industrie, doter le pays d'une soufflerie géante où pourront être réalisés des essais d'avions en vraie grandeur, doter le ministère de l'Air d'un service des recherches, nationaliser l'École supérieure d'aéronautique, et développer l'enseignement et la recherche en mécanique des fluides dans les facultés des sciences. Il est ainsi décidé, avec l'accord de ces facultés et avec des soutiens locaux, la création de quatre instituts de mécanique des fluides – à Paris, Lille, Marseille et Toulouse – et de cinq centres annexes d'enseignement – à Strasbourg, Poitiers,

Nantes, Caen et Lyon. Jean Villey (1885-1948), maître de conférences de mécanique physique à la Sorbonne, est nommé chef de service au ministère de l'Air afin de faciliter les relations avec les facultés.

Les instituts et centres annexes commencent à fonctionner au cours de l'année universitaire 1929-1930, un an à peine après les premières prises de contact. Ils sont dotés de moyens considérables : création de chaires, de maîtrises de conférences et d'emplois de chef des travaux et d'assistant, financement de « collaborateurs scientifiques » pour des thèses de doctorat, construction de grandes souffleries et incitation des constructeurs à y réaliser leurs essais, et création d'une collection de *Publications Scientifiques et Techniques du ministère de l'Air* (PST) où seront publiés les thèses et travaux entrepris. Chaque faculté concernée crée un certificat d'enseignement supérieur en mécanique des fluides – la licence correspond alors à l'obtention de trois certificats. Le programme de ce certificat, national, conjugue à parts égales enseignement théorique (par un mathématicien), enseignement expérimental (par un physicien) et enseignement pratique (par un ingénieur). Un concours national annuel récompense les meilleurs étudiants. Outre l'ampleur des moyens accordés, l'ouverture d'esprit du ministère de l'Air, réaffirmée dans de nombreux courriers et rapports, apparaît tout à fait remarquable. À propos des recherches susceptibles d'être financées, il est ainsi déclaré, dans la lettre de cadrage adressée en juin 1929 aux doyens des facultés des sciences :

Les sujets pourront en être choisis dans un esprit très large : elles visent à l'obtention de tout progrès intéressant dans les divers domaines des applications aéronautiques, même si l'échéance n'en apparaît que lointaine.

3. La mécanique des fluides en trois questions

3.1. *La résistance à l'avancement*

Au début du xx^e siècle, la mécanique des fluides est confrontée à trois grandes questions. La première est celle de la résistance à l'avancement – ou « traînée » – d'un corps solide dans un fluide. Pour des corps de dimension métrique se déplaçant dans l'air ou dans l'eau (véhicule, bateau, avion), c'est-à-dire à grand nombre de Reynolds, les effets visqueux sont *a priori* très faibles. Or, on sait depuis Euler et d'Alembert que les équations qui gouvernent les écoulements sans viscosité prédisent une résistance nulle, résultat en contradiction avec l'expérience la plus élémentaire [58, § 1.3]. Ce « paradoxe de d'Alembert » a pu être contourné par Helmholtz par l'introduction à l'aval de l'obstacle de « surfaces de discontinuité » séparant un écoulement externe potentiel d'un « sillage » de fluide au repos. Les écoulements plans (bidimensionnels) peuvent ainsi être calculés en faisant intervenir des transformations conformes (Kirchhoff, Rayleigh, Levi-Civita, Brillouin, Villat).

Cette approche n'est cependant pas satisfaisante à plusieurs points de vue, du fait notamment de l'extension du sillage jusqu'à l'infini aval, de l'instabilité de la surface de discontinuité, et d'une sous-estimation importante de la traînée. L'instabilité de la surface de discontinuité, en particulier, se manifeste par l'apparition de tourbillons alternés advectés vers l'aval, tourbillons étudiés notamment par Henri Bénard et Theodore von Kármán.

3.2. *La portance*

Une autre question est celle de l'origine de la force qui maintient un oiseau en vol et serait susceptible de porter un avion. La question devient aiguë lorsque dans les années 1905-1910 s'envolent les premiers avions, dont les performances (vitesse, altitude, charge emportée) s'améliorent de façon fulgurante, sur des bases essentiellement empiriques. Il apparaît dans les mêmes années

que la circulation de la vitesse du fluide autour d'un obstacle engendre une portance importante (Lanchester, Kutta, Joukovsky), circulation dont l'origine peut être trouvée, comme le montre Prandtl, dans l'advection dans le sillage de la vorticité générée dans une fine « couche limite » au voisinage immédiat de l'obstacle [58, 59]. La théorie de la couche limite de Prandtl renouvelle du même coup les questions de la traînée et du détachement de l'écoulement dans un sillage. Cette théorie, présentée par Prandtl en 1904 dans un congrès de mathématiques, passe cependant à peu près inaperçue. Développée dans les années suivantes par Prandtl et ses étudiants, elle ne sera pleinement reconnue par la communauté scientifique que deux décennies plus tard [44].

3.3. *La turbulence*

La troisième question est celle de la turbulence qui affecte un grand nombre d'écoulements naturels et industriels, et dont le caractère désordonné, tant dans l'espace que dans le temps, résiste à toute analyse. Les propriétés de mélange de la turbulence ont mis Saint-Venant et Boussinesq sur la piste d'une « viscosité effective » ou turbulente, très supérieure à la viscosité moléculaire, qui interviendrait dans la dynamique de l'écoulement moyen. Les équations de ce mouvement moyen ont été établies par Osborne Reynolds en 1895, mais le lien entre les moyennes des produits de fluctuations (les « contraintes de Reynolds ») et la physique de la viscosité turbulente échappe : c'est le problème de la « fermeture » des équations de Reynolds. Deux pistes s'ouvrent dans les années 1915 à 1930, inspirées par la mécanique statistique : l'analyse statistique de la turbulence à petite échelle, dont les bases sont posées par Geoffroy I. Taylor, et, à plus grande échelle, le concept de longueur de mélange introduit par von Kármán et Prandtl et qui, pour l'écoulement au voisinage d'une paroi, conduit au profil logarithmique de la vitesse [60, chaps. 6-7].

4. Contributions françaises avant 1930

Les contributions françaises à l'éclaircissement des questions ci-dessus sont, jusqu'en 1930, essentiellement le fait de quelques personnalités scientifiques dont les plus marquantes sont présentées ci-dessous.

4.1. *Gustave Eiffel*

Au début des années 1890, Gustave Eiffel (1832-1923), ingénieur mondialement réputé pour ses constructions métalliques, décide de consacrer la dernière partie de sa vie – il est alors âgé de soixante ans – à la question de la résistance au vent des corps solides [61, chap. 7]. Son premier laboratoire est installé dans sa tour sur le Champ-de-Mars à Paris. Le corps qu'il s'agit d'étudier (plaqué, sphère, etc.) est placé dans une cage chutant le long d'un câble tendu sur les 115 mètres entre le premier étage de la tour et le sol. La vitesse de chute peut atteindre 40 m/s. Un dispositif mécanique, récupéré à l'issue de la chute, enregistre sur un cylindre tournant la vitesse du corps et la force aérodynamique s'exerçant sur lui.

Afin de s'affranchir des aléas météorologiques, un second laboratoire est installé en 1909 au pied de la tour. Il s'agit d'une soufflerie logée dans un bâtiment fermé, où l'objet maintenant immobile est placé dans le courant d'air créé à l'aval par un ventilateur (plutôt un aspirateur) et monté sur une balance de mesure des forces aérodynamiques. Trois ans plus tard, un nouveau laboratoire est installé à Auteuil. Eiffel apporte deux innovations majeures à la conception des souffleries qui alors se développent en Europe : (i) la veine d'air traverse librement la chambre d'essais (sans être contrainte par des parois latérales), facilitant ainsi grandement les mesures ;

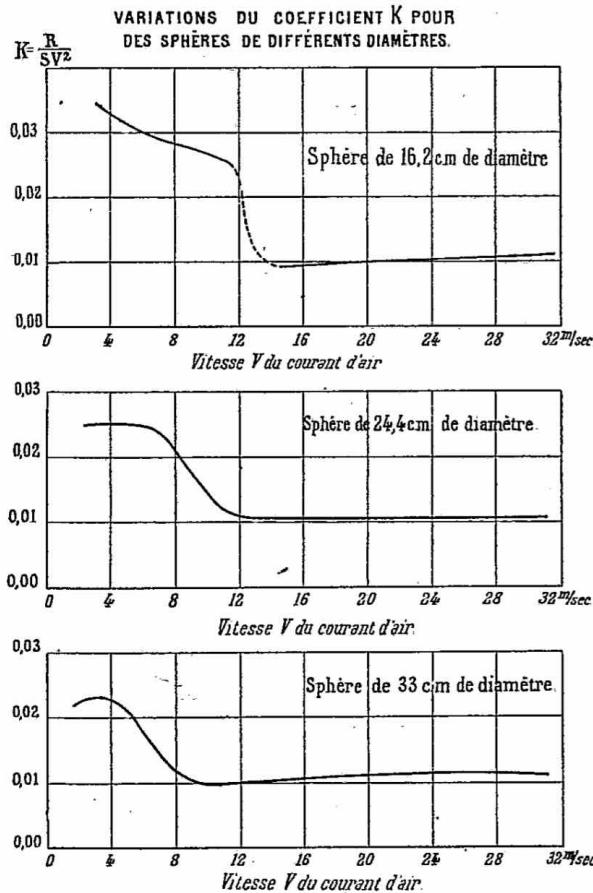


FIGURE 2. Variation du coefficient de traînée d'une sphère en fonction de la vitesse de l'air, mettant en évidence une « crise de traînée » [2].

(ii) un divergent à faible angle d'ouverture est interposé entre la chambre d'essai et le ventilateur, diminuant fortement la puissance nécessaire au ventilateur. La réputation d'Eiffel et la qualité de ses expériences conduisent les constructeurs aéronautiques à lui confier leurs essais, avec comme condition posée par Eiffel que les résultats devront pouvoir être publiés librement. Quatre mille essais sont ainsi réalisés entre 1909 et 1912 [1]. Une synthèse de ses travaux est régulièrement publiée dans des ouvrages traduits en plusieurs langues.

Une observation majeure d'Eiffel, publiée en 1912 dans les *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, est la chute brutale, au-delà d'une certaine valeur de la vitesse du vent, de la traînée sur une sphère (figure 2). Intrigué, Prandtl rend visite à Eiffel pour se convaincre d'un phénomène qui a échappé à ses propres investigations. Faisant le lien avec des mesures de traînée sur une plaque plane réalisées par Blasius et qui ne restituent pas la loi en $U^{3/2}$ attendue, Prandtl comprend bientôt la raison de cette « crise de traînée » : la couche limite devenue turbulente décolle de la sphère plus loin en aval, autorisant une remontée de la pression sur son culot. Le phénomène obéit à la similitude de Reynolds, mais la valeur critique du nombre de Reynolds dépend du niveau de turbulence de l'écoulement incident. Le phénomène a des implications pratiques importantes ; il est à l'origine, en particulier, d'une méthode d'estimation du niveau de turbulence d'une soufflerie.

4.2. *Henri Bénard*

Henri Bénard (1874-1939) est sans doute le plus connu des mécaniciens français de la première moitié du xx^e siècle [62, 63]. On lui doit deux découvertes d'une grande portée : les cellules thermoconvectives dans une couche de fluide chauffée par le bas (cellules de Rayleigh-Bénard), et les tourbillons alternés dans le sillage d'un corps solide (allées tourbillonnaires de Bénard-von Kármán). La première découverte fait l'objet de sa thèse soutenue en 1901 à la faculté des sciences de Paris [3]. Rayleigh en fait une théorie en 1916 qu'il introduit ainsi : « *The present is an attempt to examine how far the interesting results obtained by Bénard in his careful and skilful experiments can be explained theoretically.* » [4]. Cette théorie, qui attribue l'origine de l'instabilité à la force d'Archimède, ne rend cependant pas bien compte des observations de Bénard : elle prédit en particulier une valeur trop élevée du seuil de l'instabilité. Bénard a bien conscience du désaccord sans parvenir à en déterminer l'origine. Le problème ne sera résolu que dans les années cinquante lorsqu'il sera compris que l'origine des cellules de Bénard ne réside pas dans la force d'Archimède mais plutôt dans la tension de surface [64, p. 75-78].

La seconde découverte, des tourbillons de sillage, est réalisée à la faculté des sciences de Lyon où Bénard débute sa carrière universitaire, puis à Bordeaux où il obtient un poste de professeur, et enfin à Paris à partir de 1922. Une grande originalité de Bénard est son utilisation de la caméra comme instrument d'investigation scientifique, associée à un système optique lui permettant d'accéder à une résolution spatiale de quelques micromètres [62, 65]. La théorie non visqueuse de von Kármán (lequel réalise aussi quelques expériences, moins poussées que celles de Bénard) ne prédit pas bien la fréquence des tourbillons, en particulier au voisinage du seuil de l'instabilité du sillage stationnaire où les effets visqueux sont importants.

4.3. *Charles Camichel*

Charles Camichel (1871-1966), normalien comme Bénard, est nommé en 1900 maître de conférences à la faculté des sciences de Toulouse après avoir exercé cinq ans à Lille. Il y crée un enseignement d'électricité industrielle et, soutenu par le doyen Paul Sabatier et par la municipalité, il fonde en 1907 un institut électrotechnique, fondation de la Ville [66]. En 1913, Camichel adjoint à son institut un laboratoire d'hydraulique afin de répondre aux sollicitations de la Compagnie des chemins de fer du Midi. Celle-ci déploie en effet l'hydroélectricité dans les Pyrénées afin d'électrifier son réseau ferroviaire, et rencontre de nombreux problèmes d'hydraulique dans ses installations. Les études de Camichel, sur les coups de bâlier en particulier, assoient sa réputation et lui valent de fortes subventions du ministère des Travaux publics. La nécessité d'étudier en laboratoire, sur modèles réduits, les phénomènes observés en usine, l'oriente vers l'étude des conditions de similitude des écoulements. À titre d'illustration, la figure 3 montre la chute de pression normalisée dans un coude à angle droit en fonction du nombre de Reynolds. Notons que ce dernier y varie sur plus de cinq ordres de grandeur. Le quasi-plateau observé pour $Re \gtrsim 1000$ définit le domaine où doivent être menées, selon Camichel, les études sur modèle réduit : l'indépendance vis-à-vis du nombre de Reynolds permet alors à une autre condition de similitude d'être satisfaite, par exemple sur le nombre de Froude pour les ouvrages à surface libre.

Camichel, qui a fait sa thèse au Collège de France sous la direction de Marcel Brillouin, double ses études d'hydraulique de recherches plus fondamentales en mécanique des fluides. Il développe en particulier la chronophotographie qui lui permet de visualiser la structure des écoulements (figure 4). Il en détermine ainsi, par exemple, les régions potentielles par la mise en œuvre du théorème de Stokes. Il étudie en détail les tourbillons de sillage, et publie en 1927, avec ses étudiants Max Teissié-Solier et Pierre Dupin, la première courbe donnant la fréquence des tourbillons (nombre de Strouhal) en fonction du nombre de Reynolds (figure 5).

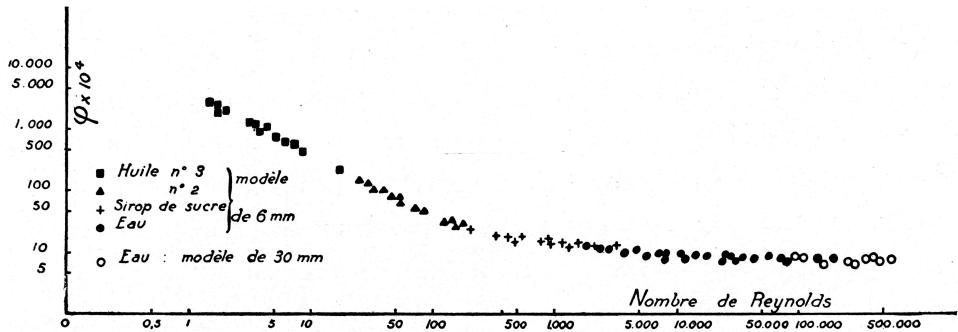


FIGURE 3. Chute de pression normalisée $\varphi = \Delta p / \rho V^2$ dans des coude à angle droit, fonction du nombre de Reynolds; la viscosité des fluides couvre une gamme dont les valeurs extrêmes sont dans un rapport de 373 [5].

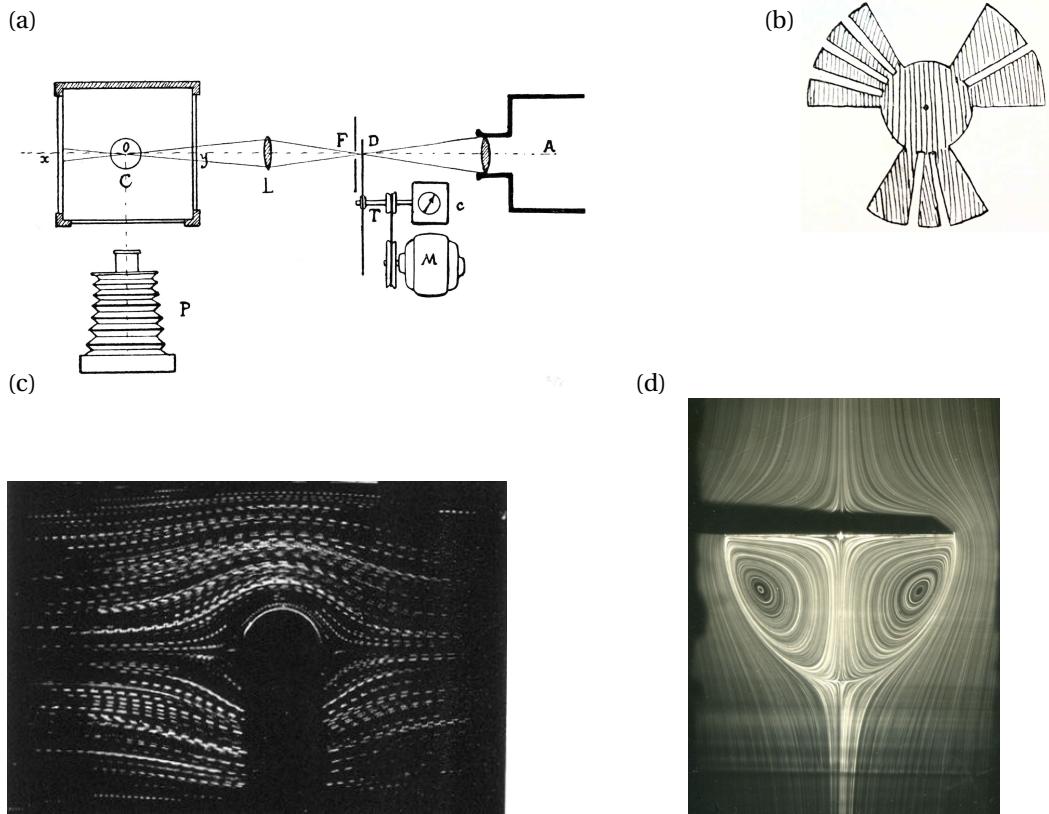


FIGURE 4. (a) Montage chronophotographique de Camichel : le faisceau lumineux issu de A est intercepté par le disque tournant denté D ; le faisceau émergeant de la fente F éclaire le plan xOy de l'écoulement dans la conduite C , photographié par l'appareil P [6]. (b) Disque denté pour l'étude des écoulements instationnaires [7]. (c) Écoulement autour d'un cylindre à petit nombre de Reynolds [8]. (d) Écoulement autour d'une plaque ($Re = 91$) [9].

La fréquence des tourbillons est mesurée par chronophotographie, par stroboscopie ou par velocimétrie par fil chaud.

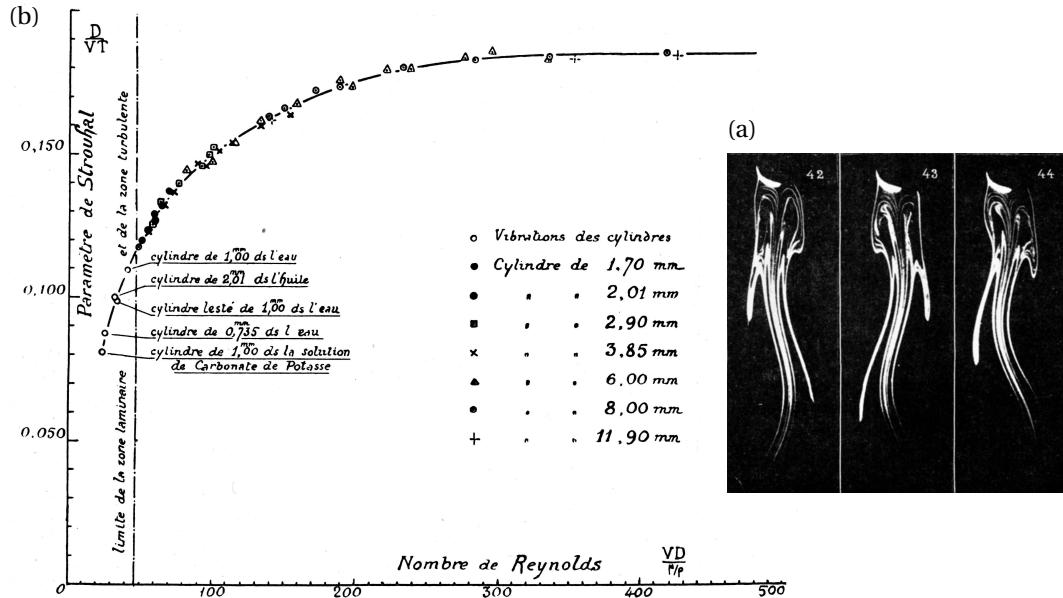


FIGURE 5. (a) Sillage d'un barreau cylindrique à trois instants différents, visualisé par un précipité chimique. (b) Fréquence des tourbillons (nombre de Strouhal) en fonction du nombre de Reynolds; les points en dessous de $Re_c \approx 48$ correspondent aux oscillations transitoires provoquées par une perturbation localisée au voisinage du barreau [10].

Sept thèses de doctorat d'État sont soutenues entre 1919 et 1931, sur l'hydraulique des conduites et des déversoirs (D. Eydoux, A. Foch, C. Ledoux, C. Boujon), sur la similitude (L. Escande), et sur la chronophotographie rapide et les tourbillons de sillage (P. Dupin, M. Teissié-Solier).

4.4. Antoine Magnan

Antoine Magnan (1881-1938), médecin et physiologiste, professeur à l'École pratique des hautes études, est l'auteur inattendu de contributions originales à la mécanique des fluides et la turbulence atmosphérique. Magnan s'intéresse à la nage des poissons et au vol des oiseaux qu'il étudie à l'aide de la « cinémitrailleur » d'Étienne-Jules Marey et d'instruments arrimés sur l'animal – tels des accéléromètres enregistreurs sur le dos des oiseaux. Afin de mieux connaître la vitesse du vent et sa variation avec l'altitude, Magnan et ses collègues Eugène Huguenard et André Planiol mettent au point à partir de 1923 l'anémométrie par fil chaud [11] – dans les mêmes années que Burgers aux Pays-Bas et Dryden et Kuethe aux États-Unis. Le signal mesuré au sommet de perches est renvoyé au sol par ondes radio. Magnan caractérise ainsi les accélérations de l'air, les effets thermiques, l'effet d'obstacles (végétation, bâtiments) et de la rugosité du sol. La figure 6 montre deux enregistrements réalisés en 1925 sur l'île de Ré : celui d'un vent de mer, régulier, et celui d'un vent de terre, beaucoup plus turbulent.

Magnan pratique par ailleurs le vol à voile et participe à des conférences internationales sur le sujet. En 1926, le ministère de l'Air fonde pour lui, au Collège de France, une chaire

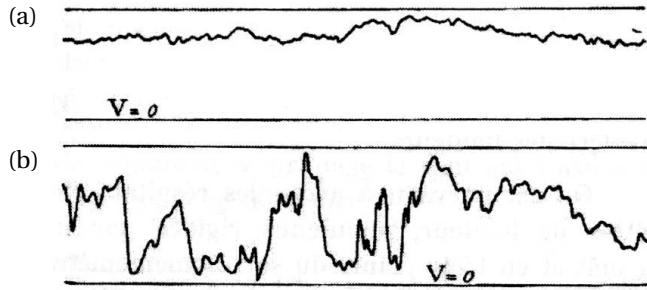


FIGURE 6. Mesure de vent par un anémomètre à fil chaud sur l'île de Ré (1925); (a), brise marine W-SW à 2 m au-dessus du sol; (b) brise de terre N-E à 10 m au-dessus du sol. La durée des enregistrements est 20 s, l'échelle verticale entre les tirets est (a) 12 m/s, (b) 15 m/s [13].

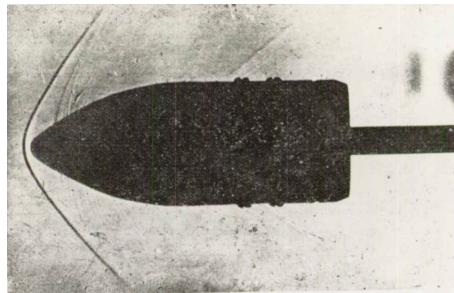


FIGURE 7. Visualisation en ombroscopie d'une onde de choc stationnaire à l'avant d'un projectile de 37 mm [14].

de mécanique animale appliquée à l'aviation. Les publications de Magnan, dans les *Comptes rendus* de l'Académie des sciences, dans *La Technique Aéronautique* et dans les *Publications* du ministère de l'Air, sont connues à l'étranger [12] et traduites en américain par le NACA. Dans un autre domaine, les travaux de Huguenard sur les écoulements compressibles et les ondes de choc (figure 7), dans les années vingt, sont également traduits par le NACA.

4.5. *Henri Villat*

Henri Villat (1879-1972), mathématicien intrigué par le « paradoxe de d'Alembert », vient à la mécanique des fluides par des échanges avec Boussinesq et Brillouin [67]. Sa thèse, soutenue en 1911, porte sur le problème de l'écoulement non visqueux autour d'un obstacle, dans le cadre des surfaces de discontinuité d'Helmholtz-Kirchhoff. Prolongeant les travaux de Tullio Levi-Civita pour les obstacles courbes, où la forme de l'obstacle n'intervient que de façon implicite, Villat élabore une méthode de calcul pour un obstacle de forme prescrite. Il est nommé maître de conférences à Montpellier, puis professeur à Strasbourg dans les « provinces recouvrées ». Ses talents d'organisateur lui valent de présider en 1920, à Strasbourg, le Congrès international de mathématiques. Lorsqu'en 1927 Painlevé démissionne de la chaire de mécanique des fluides à la Sorbonne, Villat lui succède.

Villat, virtuose des fonctions spéciales, s'attache à la recherche de solutions exactes aux équations de Navier-Stokes. Il accorde peu de valeur à la théorie de la couche limite de Prandtl

dont le caractère approché ne le satisfait pas. Dans le fil des travaux de Carl Oseen à Stockholm, il cherche plutôt une solution intégrale sur tout le domaine fluide, à partir de laquelle, faisant tendre la viscosité vers zéro de la bonne façon, on obtiendrait la solution à viscosité faible ou nulle. Élu membre de l'Académie des sciences en 1932, Villat s'impose dans l'entre-deux-guerres comme l'une des figures majeures des mathématiques françaises [68]. C'est vers lui que se tourne naturellement Caquot, en 1928, pour définir un programme de développement de la mécanique des fluides française.

4.6. *Internationalisation de la mécanique des fluides*

La naissance d'une communauté internationale de la mécanique des fluides peut être située en 1922, où, à l'initiative de von Kármán, est organisée à Innsbruck une conférence internationale [69]. Au vu du succès de cette conférence, une nouvelle rencontre est organisée deux ans plus tard à Delft aux Pays-Bas, territoire resté neutre dans le conflit mondial qui vient de se terminer et où les anciens belligérants sont censés pouvoir se retrouver. Mais le contexte international reste tendu, et Français et Allemands refusent d'y participer. En dépit de ces absences, la rencontre de Delft s'institue première Conférence Internationale de Mécanique Appliquée (ICAM). La situation se détend en 1926, où le Conseil International de la Recherche (IRC) lève les sanctions qui frappaient l'Allemagne. La deuxième ICAM qui se tient cette année-là à Zurich compte dans son comité d'organisation quatre Français (Henri Villat, Émile Jouguet, Ernest-Paul Hahn et Gabriel Koenigs). Deux Français sont invités à y donner une conférence plénière, Camichel sur la théorie des coups de bâlier, et Jouguet sur la théorie thermodynamique de la propagation des explosions [69]. Les ICAM seront désormais quadriennales – la suivante se tiendra en 1930 à Stockholm.

La montée du national-socialisme en Allemagne dans les années trente entraîne un regain de tension et l'émigration de nombreux universitaires allemands. Von Kármán émigre ainsi au *California Institute of Technology* (CalTech) où il fonde un laboratoire d'aérodynamique, le Galcit. De nombreux chercheurs européens y seront accueillis – dont le français Charles Sadron (*cf. ci-après*) financé par la fondation Rockefeller.

5. L'institut de mécanique des fluides de Paris

Le développement de l'enseignement et de la recherche en mécanique des fluides est, à partir de 1928, l'un des grands objectifs du ministère de l'Air et de son directeur général technique Albert Caquot. L'institut de mécanique des fluides de Paris en est la première réalisation.

5.1. *Création et premières évolutions*

L'institut parisien créé en 1929 regroupe trois chaires : une chaire théorique (Villat professeur et Henri Beghin maître de conférences, tous deux mathématiciens), une chaire expérimentale (Bénard et Adrien Foch, physiciens), et la chaire d'Aviation (Marchis et Albert Toussaint, physiciens). L'institut aérotechnique de Saint-Cyr y est absorbé et en devient son « laboratoire d'aérodynamique ». Villat est nommé directeur du nouvel institut et Dimitri Riabouchinsky directeur adjoint sur un poste d'ingénieur. La Sorbonne souffrant cruellement d'une pénurie de locaux, Caquot offre à Bénard d'installer son laboratoire dans un bâtiment du ministère de l'Air, rue de la Porte d'Issy.

Trois ans plus tard, l'institut absorbe le laboratoire de mécanique physique de la Sorbonne et son intitulé devient « institut de mécanique ». La chaire de mécanique physique, vacante au

départ à la retraite de Gabriel Koenig, est attribuée à Henri Beghin. La maîtrise de conférences qu'occupait Beghin est alors attribuée à Joseph Pérès. (Notons que Foch et Pérès, antérieurement professeurs à Bordeaux et Marseille, respectivement, sont déqualifiés au rang de maître de conférences, mais avec la perspective d'une carrière parisienne plus prestigieuse.)

5.2. *Recherches de Henri Villat*

Les travaux de Villat à l'institut de mécanique de Paris s'inscrivent dans la continuité de ses travaux antérieurs sur l'hydrodynamique non visqueuse (les sillages d'Helmholtz-Kirchhoff), les tourbillons visqueux plans, et la recherche de solutions intégrales aux équations de Navier-Stokes. Le leader de la mécanique des fluides française continue d'ignorer la théorie de la couche limite, tant dans ses recherches que dans ses enseignements et ouvrages, de même qu'il ignore les théories statistiques de la turbulence. Quant à l'expérimentation, Villat s'y intéresse peu, ses ouvrages n'en parlent pas « par souci de concision ». Une lettre de von Kármán à Jerome Hunsaker, organisateur de l'ICAM de 1938 à Cambridge (Massachusetts) situe sa réputation à l'échelle internationale [70] :

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.

Villat n'en est pas moins une personnalité brillante et cultivée, homme de pouvoir, hautement respecté par ses collègues mathématiciens. Dans les années trente, il dirige six thèses (A. Gay, H. Poncin, M. Sédille, J. Leray, M.-L. Dubreil-Jacotin et C. Jacob). Jean Leray, le plus brillant de ses élèves, sera professeur au collège de France. Dans les années quarante, Villat dirige encore quatre thèses sur les écoulements potentiels plans et les sillages de Helmholtz (J. Kravtchenko, A. Oudart, I. Carstoiu et R. Huron), et une cinquième, codirigée avec Pérès, sur les écoulements compressibles transsoniques (H. Cabannes).

5.3. *Le laboratoire de mécanique expérimentale des fluides*

Nommé en 1929 sur la nouvelle chaire de mécanique expérimentale des fluides, Henri Bénard poursuit dans les années trente l'investigation des tourbillons thermoconvectifs et des tourbillons de sillage. Son laboratoire, installé rue de la Porte d'Issy dans un bâtiment prêté par le ministère de l'Air, bénéficie du concours de nombreux « collaborateurs scientifiques » financés par le ministère de l'Air.

À partir de 1935, les travaux de Bénard sur la thermoconvection s'inscrivent dans le cadre de la Commission de la turbulence atmosphérique créée cette année-là par le ministère de l'Air. Cette commission, présidée par Philippe Wehrlé, directeur de l'Office national météorologique, a pour mission de coordonner les travaux des ingénieurs de l'Aéronautique et de scientifiques tels le météorologue Paul Idrac et le mathématicien Joseph Kampé de Fériet [15]. Bénard y poursuit l'idée que certaines formations nuageuses, notamment les « nuages en bandes », résultent d'une instabilité de même nature que celle qu'il étudie à petite échelle en laboratoire [16].

Les expériences, menées notamment avec son étudiant Dusan Avsec, visent notamment à augmenter l'épaisseur de la couche fluide – elle atteint la dizaine de centimètres sur la figure 8(a) – afin de se rapprocher de situations atmosphériques. Bénard et Avsec montrent également qu'un champ électrique peut induire des mouvements convectifs (figure 8(b)) et expliquer certains phénomènes atmosphériques – le phénomène est étudié à la même époque par G. I. Taylor à Cambridge.

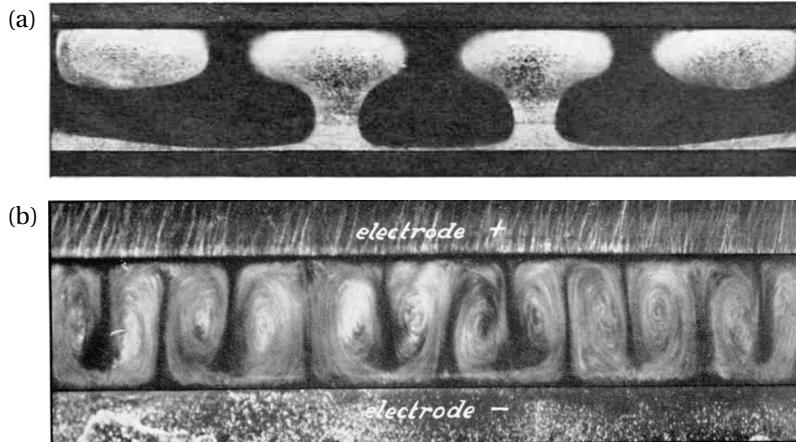


FIGURE 8. (a) Cellules thermoconvectives dans de l'air, visualisées par la condensation de vapeur d'eau au voisinage de la paroi supérieure plus froide. (b) Électroconvection dans une couche huile d'épaisseur 28 mm [17].

Dans l'idée de reproduire en laboratoire l'effet du vent sur les mouvements thermoconvectifs, Bénard et Avsec superposent un écoulement horizontal au forçage thermique vertical. Ils montrent que les tourbillons s'orientent alors dans le sens de l'écoulement, et que la longueur d'onde transverse peut être contrôlée par une indentation périodique des parois à l'entrée du canal. Si la longueur d'onde imposée à l'entrée s'écarte trop d'une certaine longueur naturelle, elle relaxe à l'aval vers cette longueur naturelle (figure 9) – phénomène analysé dans les années soixante par Viktor Eckhaus. Bénard et Avsec étudient également l'effet d'une stratification en densité – situation fréquente dans l'atmosphère – en superposant de l'air sec au-dessus d'une couche plus dense de fumée de tabac. Ils montrent que les cellules convectives s'orientent longitudinalement ou transversalement selon que domine l'instabilité thermique ou l'instabilité d'Helmholtz.

Une autre direction de recherche, objet de la thèse F.-J. Bourrières, porte sur « l'instabilité du tuyau d'arrosage », instabilité fluide-structure qui induit des oscillations de l'extrémité libre d'un tuyau souple parcouru par de l'eau.

Les travaux de Foch, maître de conférences associé à la chaire de Bénard, portent sur l'aérodynamique à grande vitesse, la visualisation des écoulements, et la physique des fluides. Une soufflerie supersonique est mise en service en 1931. Des techniques de visualisation par stroboscopie ou par interférométrie, objet des thèses de R. Tremblot et L. Santon, sont mises au point en collaboration avec Charles Fabry à l'École polytechnique. La figure 10(a) montre une onde de choc formée à l'avant d'un profil d'aile. Charles Chartier, autre étudiant de Foch, améliore la visualisation d'écoulements instationnaires par chronophotographie (figure 10(b)) et met au point un dispositif stéréoscopique de mesure de champs de vitesses tridimensionnels. Dans le domaine de

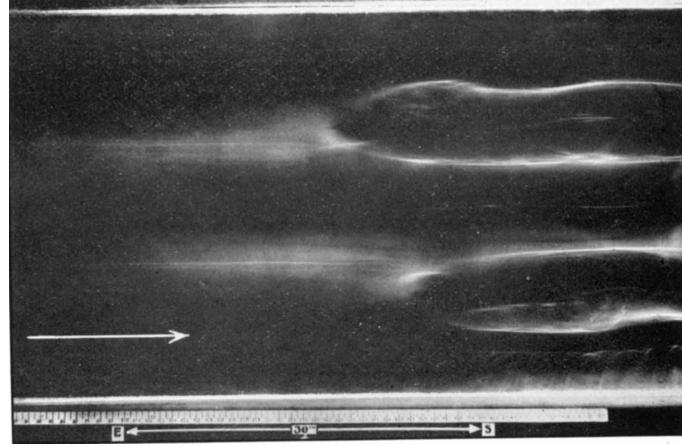


FIGURE 9. Rouleaux thermoconvectifs longitudinaux dans un écoulement de Poiseuille de largeur 335 mm : la longueur d'onde initiale forcée par des indentations sur les parois (sur la gauche, $\lambda/H \approx 2.8$), relaxe à l'aval vers une valeur plus faible ($\lambda/H \approx 1.7$) [17].

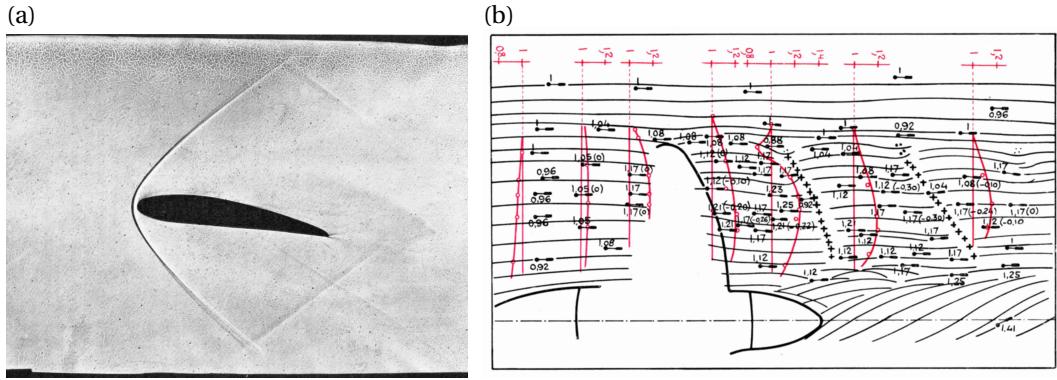


FIGURE 10. (a) Onde de choc formée à l'amont d'un cylindre, visualisée par stroboscopie [18] ; (b) Écoulement autour d'une hélice marine à trois pales, pour une vitesse de rotation correspondant à la puissance propulsive maximale [19].

la physique des fluides, André Fortier réalise des mesures de viscosité dont la précision permet d'accéder à une détermination des dimensions moléculaires.

Riabouchinsky, expérimentateur éclectique, aborde de son côté divers problèmes de dynamique tourbillonnaire, de formation de bulles de cavitation, et d'écoulements compressibles. La figure 11 montre un tourbillon de surface hélico-conique formé sur l'axe d'un cylindre tournant rempli d'eau. Dans un autre registre, Riabouchinsky joue un rôle important à l'institut de mécanique dans l'invitation de conférenciers étrangers. Il entretient des relations privilégiées avec la Russie (dont il demeure citoyen) et dirige plusieurs thèses de ses compatriotes. Il résumera ses travaux dans trois articles de synthèse [20–22].

Bénard meurt prématurément en 1939. Sa chaire est alors attribuée à Foch, et la maîtrise de conférences libérée est attribuée au physicien Yves Rocard. Ce dernier réalise de nombreuses expertises pour le ministère de l'Air, montrant notamment que les accidents d'avions de chasse survenant à grande vitesse résultent d'une résonance des oscillations de vibration et de flexion

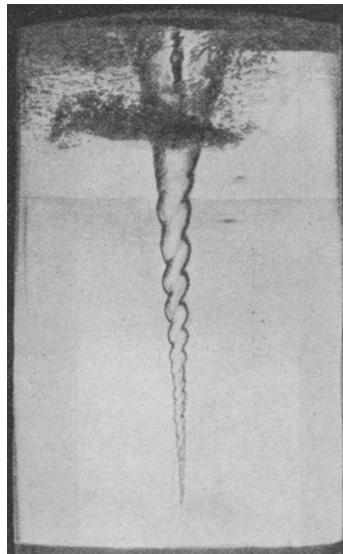


FIGURE 11. Tourbillon hélico-conique formé sur l'axe d'un cylindre tournant [21].

des ailes [71, p. 40-43]. Rocard quitte l'institut de mécanique de Paris en 1941 (où il est remplacé par Edmond Brun), et poursuivra sa carrière à l'École normale supérieure de Paris.

5.4. *Le laboratoire d'analogies électriques*

Joseph Pérès (1890-1962), nommé à Paris en 1932, arrive de l'institut de mécanique des fluides de Marseille qu'il a dirigé pendant deux ans. Il est accompagné de l'un de ses étudiants, Lucien Malavard (1910-1990), avec lequel il reprend, par la méthode des analogies électriques, l'étude des écoulements potentiels autour de profils d'ailes. Il convainc les constructeurs et le Service technique de l'Aéronautique de l'intérêt de leur « calculateur d'ailes » qui remplace de longs et coûteux essais en soufflerie. Les analogies électriques permettent également d'étudier, au-delà de l'aérodynamique, de nombreux problèmes régis par l'équation de Laplace ou par des équations du même type, dans le domaine de l'élasticité, de l'électrostatique, du magnétisme, et des écoulements en milieux poreux. À l'étroit dans le laboratoire de Bénard où il s'est initialement installé, il obtient du ministère de l'Air, en 1937, l'attribution de locaux propres mitoyens de ceux de Bénard.

Lors de l'invasion du pays en 1940, le ministère de l'Air est occupé par les Allemands et les installations expérimentales de Bénard et Pérès sont détruites ou emportées en Allemagne. Pérès et Malavard parviennent cependant à poursuivre, à l'École normale supérieure, une activité clandestine pour les constructeurs français. Pérès obtient en 1941 la chaire de mécanique rationnelle à la Sorbonne, cédant la maîtrise de conférences à Jean Leray, ancien étudiant de Villat.

5.5. *Le laboratoire d'aérodynamique*

Lucien Marchis (1863-1941), titulaire de la chaire d'Aviation intégrée en 1929 à l'institut de mécanique de Paris, maintient de nombreux contacts avec les constructeurs aéronautiques, mais ne mène pas véritablement de recherches. La direction du laboratoire d'aérodynamique, à Saint-Cyr, est assurée par Albert Toussaint (1885-1956), maître de conférences, assisté par

deux ingénieurs, Frédéric Gruson et Jean Lacaine. Toussaint encadre, dans les années trente, cinq thèses de doctorat portant sur divers problèmes relatifs aux ailes monoplanes et biplanes, aux ailerons et empennages, aux interactions aile-hélice, et à la sensibilité des structures à la turbulence atmosphérique. Henry Girerd, l'un des étudiants de Toussaint, sera après la guerre conseiller de l'ONERA et titulaire de la chaire de technique aéronautique du CNAM. Robert Silber sera maître de conférences à l'université de Grenoble. Élie Carafoli, autre chercheur du laboratoire, deviendra membre de l'Académie des sciences de Roumanie.

Le peu d'intérêt manifesté par Villat pour le laboratoire d'aérodynamique conduira Painlevé, ministre de l'Air en 1933, à sortir ce laboratoire de l'institut de mécanique pour le placer sous la tutelle du CNAM. L'année suivante, Toussaint obtiendra la chaire de navigation aérienne du CNAM – sans pour autant quitter sa maîtrise de conférences à la Sorbonne.

6. L'institut de mécanique des fluides de Lille

6.1. *Installation et organisation*

Lille est dans le premier tiers du XIX^e siècle la capitale d'une région industrielle dynamique, où s'est notamment installé le constructeur aéronautique Henry Potez. De grands scientifiques y ont laissé leurs marques, tels Louis Pasteur (qui y a créé la faculté des sciences), Joseph Boussinesq, Pierre Duhem et Paul Painlevé. Le projet d'institut de mécanique des fluides présenté par le recteur de l'université au ministère de l'Air, bien argumenté, convainc celui-ci en dépit de la proximité de la cité de la frontière allemande.

L'institut est créé en novembre 1929. La nouvelle chaire de mécanique des fluides est attribuée, sur la recommandation de Villat, au mathématicien Joseph Kampé de Fériet (1893-1982). Celui-ci s'est notamment illustré pendant la Première Guerre mondiale à la Commission d'artillerie de Gâvres pour ses études de balistique et pour la mise au point d'un système de suivi de projectile par cinématographie. La maîtrise de conférences associée à la chaire est attribuée au physicien André Martinot-Lagarde (1903-1986), normalien, qui prépare alors une thèse au service technique de l'Aéronautique à Issy-les-Moulineaux.

Avec le soutien du doyen de la faculté et du recteur, des crédits du plan d'outillage national sont obtenus pour la construction, sur un terrain cédé à l'université par la municipalité, d'un important bâtiment comportant notamment un amphithéâtre, une soufflerie aérodynamique, un canal hydrodynamique, et une station d'essais de machines hydrauliques. Ce bâtiment est inauguré en avril 1934 à l'occasion d'un colloque national de mécanique des fluides, le premier du genre en France, organisé par Kampé de Fériet. En 1938, une soufflerie verticale est adjointe au bâtiment, pour l'étude des vrilles d'avion. L'institut accueille un service de l'Office national de météorologie (ONM), opéré par des militaires, pour des relevés météorologiques et la couverture des vols commerciaux, en liaison avec les stations environnantes (Le Bourget, Londres, Cologne et Bruxelles).

6.2. *Activités d'enseignement et de formation*

L'institut dispense les enseignements d'un certificat de mécanique des fluides suivi par une dizaine d'étudiants. Ces étudiants se classent parmi les meilleurs au concours annuel organisé par le ministère de l'Air. Les conférences et travaux pratiques associés à ce certificat sont ouverts aux étudiants de l'Institut Industriel du Nord (IDN) et de l'École nationale des arts et métiers. L'institut délivre également un certificat d'aérodynamique et d'hydrodynamique supérieures, ouvert aux étudiants préparant l'agrégation ou se destinant à la préparation d'une thèse, où

Kampé de Fériet présente l'état des recherches dans un domaine particulier : couche limite, turbulence, dynamique de l'atmosphère, et mécanique statistique.

Des formations sont également organisées pour les enseignants du primaire supérieur et du secondaire, avec du matériel pédagogique spécialement conçu par Henri Guillemet, assistant. L'institut est enfin très investi dans la « propagande aéronautique ». Il organise des conférences de vulgarisation, anime des stands dans les expositions, offre des actions de formation dans les aéroclubs (Kampé de Fériet est lui-même féru de vol à voile), événements largement relayés par la presse locale.

6.3. *Réalisations scientifiques*

L'institut connaît dès sa création une activité importante en relation avec l'industrie régionale. Les études portent sur la caractérisation d'écoulements dans les pompes et turbines, sur la résistance au vent et le tirage de cheminées, et sur des essais d'éoliennes, d'échangeurs thermiques, de ventilateurs, ou de systèmes d'aération de voitures de tramway.

Une autre part de l'activité intéresse le constructeur aéronautique Potez et le service des recherches du ministère de l'Air. Les études d'aérodynamique sont réalisées dans la grande soufflerie de l'institut où la vitesse de l'air atteint 60 m/s dans une veine d'essai de diamètre 2,20 m (visible sur la figure 12(a)). Des balances permettent la détermination de polaires de profils d'ailes (portance et traînée en fonction de l'incidence) et la mesure des moments de tangage, de giration et de roulis. Un appareil émetteur de fumée et un éclairage stroboscopique permettent de visualiser l'écoulement autour des maquettes. L'effet de la turbulence sur les forces aérodynamiques, contrôlée par des grilles à l'amont de la maquette, est l'objet d'une attention croissante. Un tapis roulant permet de prendre en compte l'effet du sol sur la traînée aérodynamique des véhicules terrestres (une première en France). En 1937, l'institut compte 28 personnes.

Sur le plan scientifique, Kampé de Fériet porte un intérêt croissant pour la turbulence. Du point de vue expérimental, il s'agit de mieux caractériser la dynamique des anémomètres (tubes de Pitot, fils chauds). La figure 12(a) montre une installation dédiée à l'étude des temps de réponse, par l'interruption périodique de l'écoulement par une pale en rotation placée juste à l'amont de la mesure. Le signal est enregistré sur un tambour tournant (figure 12(b)) ou photographié sur l'écran d'un oscilloscope (figure 12(c)).

En liaison avec la station météorologique installée à l'institut et avec la Commission de la turbulence atmosphérique (*cf.* § 5.3), les études de dynamique atmosphérique se développent. La figure 13(a) montre le résultat d'une étude du profil vertical de la vitesse du vent, sur la première centaine de mètres, par suivi du panache de fumée émis par une fusée. Un instrument de mesure des trois composantes de la vitesse du vent (arrangement de tubes de Pitot sur une sphère) est mis au point et breveté sous le nom d'anémoclinomètre [24]. L'appareil équipe un avion-laboratoire de l'ONM (figure 13(b)) et il est diffusé à l'étranger. Des campagnes de mesure sont organisées dans les Alpes et dans le Puy-de-Dôme, auxquelles Kampé de Fériet et Martinot-Lagarde prennent une part active : observation cinématographique stéréoscopique du mouvement des nuages, appréciation des effets thermiques, estimation de l'hypothèse de Taylor de « transport gelé » de la turbulence. En 1939, Kampé de Fériet effectue une mission au Sahara afin d'étudier la couche limite atmosphérique et le phénomène d'inversion thermique.

Sur le plan théorique, Kampé de Fériet s'attache à préciser la notion de moyenne turbulente (temporelle, statistique), et s'intéresse à la diffusion turbulente. La figure 14(a) montre le schéma d'une installation d'étude, en soufflerie, de la diffusion de petites bulles de savon emportées par un écoulement d'air. La figure 14(b) montre la distribution radiale des bulles à trois distances du point d'émission. L'évolution vers l'aval de l'écart-type de cette distribution permet de tester

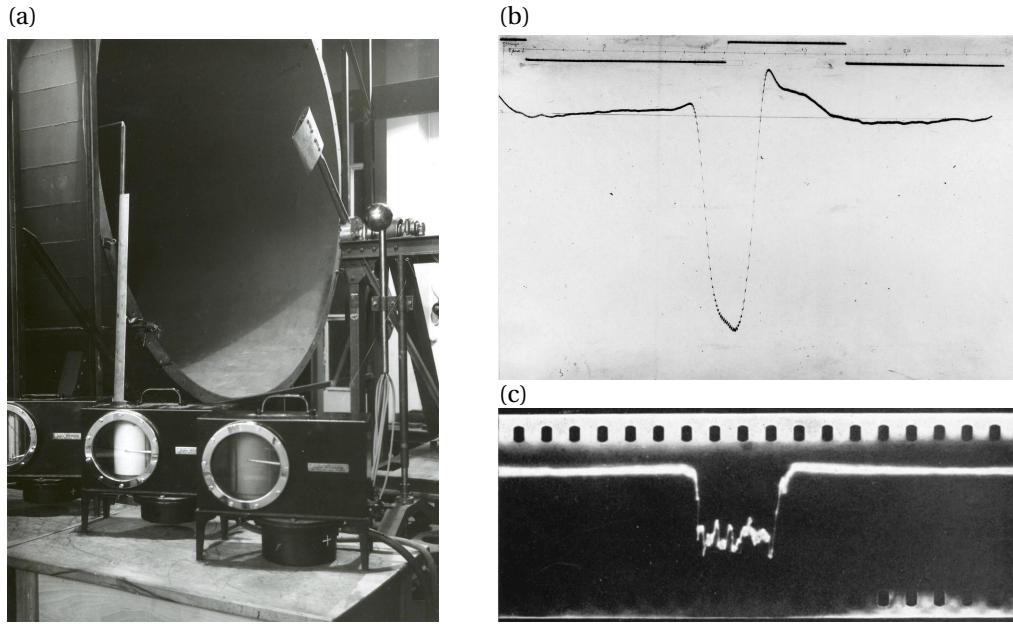


FIGURE 12. (a) Pale coupe-vent pour l'étude du temps de réponse des anémomètres; sur la table, trois enregistreurs à tambour tournant. (b) réponse d'un anémomètre Papillon pour un temps d'interruption de 2,2 secondes. (c) réponse d'un anémomètre à fil chaud photographiée sur l'écran d'un oscilloscope [23].

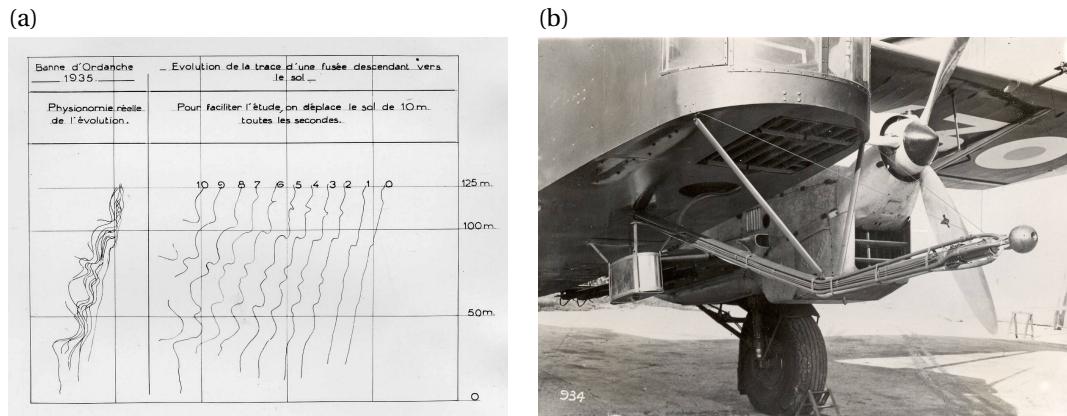


FIGURE 13. (a) Dérive du panache de fumée émis par une fusée, photographiée à intervalles d'une seconde; une discontinuité de la vitesse du vent est visible à la hauteur de 100 m (1935); (b) anémoclinomètre monté à l'avant de l'avion-laboratoire (Potez 54) de la Commission pour la turbulence atmosphérique [23].

les théories de Taylor. Kampé de Fériet participe aux conférences internationales ICAM et entretient des relations étroites avec Taylor, von Kármán et Dryden. Il est membre de l'*Institute for Aeronautical Sciences* américain et, bon germanophone, membre étranger de la société allemande d'aéronautique, la *Lilienthal Gesellschaft für Luftfahrtforschung*.

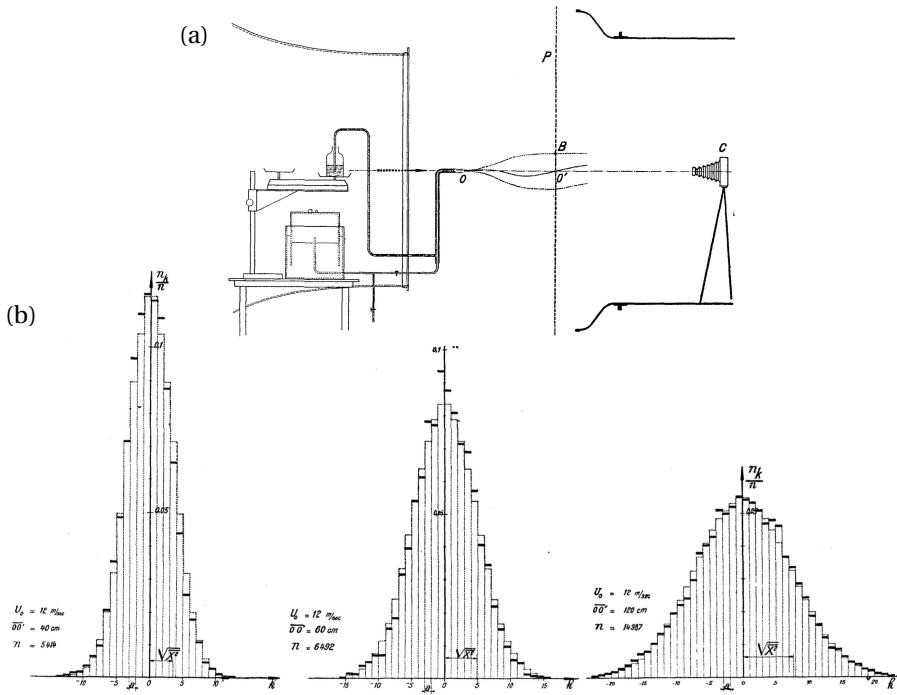


FIGURE 14. (a) Installation d'étude, dans la soufflerie, de la diffusion de petites bulles de savon dans un écoulement turbulent; (b) distribution radiale des bulles à trois distances en aval du point d'émission [25].

Trois thèses de doctorat sont soutenues en 1936 et 1937, sur l'écoulement dans un divergent (J. Demontis), sur le mouvement d'une sphère dans un liquide visqueux (J. Vagner), et un travail théorique sur l'écoulement plan visqueux autour d'un cylindre (R. Berker, futur doyen de la faculté des sciences d'Istanbul et organisateur de l'ICTAM en 1952).

Fort de ses succès, l'IMFL compte en 1938 une quarantaine de personnels. Seulement trois d'entre eux, cependant, appartiennent à la faculté des sciences, auxquels incombent la direction de l'institut et la lourde gestion de son fonctionnement. Aussi Kampé de Fériet accueille-t-il avec soulagement, en 1938, que l'institut passe sous la gérance du Groupement français pour le développement des Recherches Aéronautiques (GRA), fondation que les sociétés de construction aéronautique, nationalisées par le Front populaire, ont créé pour mutualiser leurs efforts de recherche. Ce soulagement est cependant associé à une perte d'autonomie scientifique de l'institut et à la perte de son contrôle par la faculté des sciences. Des tensions liées à cette nouvelle situation ne tarderont pas à se manifester.

6.4. *Repli à Toulouse durant la guerre*

Le 17 mai 1940, face à l'imminence de l'invasion allemande, les personnels de l'IMFL sont enjoint par le GRA de quitter Lille et de se replier à Orléans. L'installation dans cette ville – dans un hôtel dont la salle de bal est transformée en bureau d'études – est de courte durée : trois semaines plus tard, l'IMFL est contraint de fuir à nouveau l'avancée allemande. C'est dans un château vacant dans les environs de Toulouse, trouvé par Kampé de Fériet, que la vie se réorganise : vie communautaire avec les familles et reprise d'une activité scientifique.

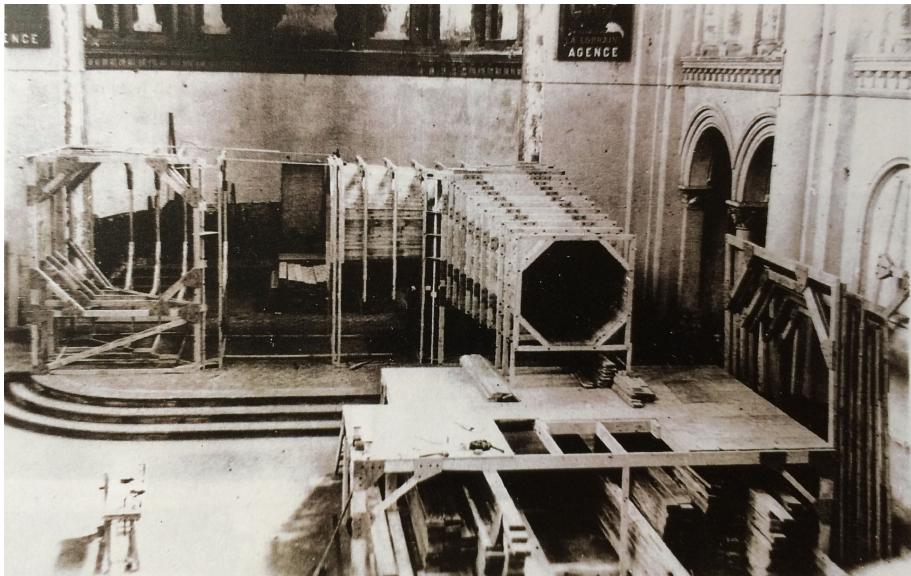


FIGURE 15. Soufflerie en construction dans « La Chapelle » mitoyenne de l’Institut électrotechnique de Toulouse. Arch. de l’Institut Pprime de Poitiers.

Des essais réalisés à Lille avant le départ sont dépouillés, des conférences sur la météorologie sont organisées dans le parc, des profils d'ailes sont testés sur les routes avoisinantes, arrimés sur le toit d'une voiture Citroën.

Une organisation plus pérenne devient possible à l'automne avec la cession par la Ville de Toulouse, par l'intermédiaire de Charles Camichel, d'une chapelle désaffectée mitoyenne de l'institut électrotechnique. L'espace offert par cette chapelle permet la construction, au cours des années suivantes, de trois souffleries. La plus grande, en bois, à retour guidé et à section octogonale, apparaît en construction sur la figure 15. Elle est mise en service en 1943.

L'activité de l'IMFL pendant la guerre est pilotée par le GRA, qui finance l'aménagement de la Chapelle, ordonne des études pour des constructeurs aéronautiques, et recrute le personnel nécessaire – l'IMFL compte quatre-vingts personnes en 1944. Une certaine activité se maintient en effet dans les sociétés nationales « épurées » par le gouvernement de Vichy – le constructeur Marcel Bloch, alias Marcel Dassault, qui refuse de collaborer, est interné puis déporté à Buchenwald. Cette activité est encadrée par un programme aéronautique « commun » franco-allemand négocié en 1941 par le secrétaire d'État à l'Aviation, le général Bergeret. Le programme devient purement allemand à partir de novembre 1942 [72].

Dans ce contexte, encore alourdi par le fonctionnement très bureaucratique imposé par le GRA à l'IMFL, les relations entre les deux partenaires se tendent [73]. Le 5 novembre 1942 – six jours avant l'invasion de la zone libre – Kampé de Fériet adresse au directeur du GRA une lettre de quatre pages dénonçant une situation qui lui interdit toute activité de recherche, et demande la résiliation de la convention liant l'IMFL au GRA. Les circonstances ne permettront pas cette résiliation, mais Kampé de Fériet démissionnera de la direction de son institut quelques mois après la Libération.

Parmi les personnels de l'IMFL repliés à Toulouse se trouve un certain François Naftali Frenkiel (1910-1986), ingénieur polonais en thèse avec Kampé de Fériet sur l'analyse statistique de la turbulence. Frenkiel achève sa thèse à Toulouse (il réalise quelques expériences dans la soufflerie de l'IMFT), mais, de confession juive, il est congédié par le GRA – son employeur – et harcelé

par l'administration française. Ses demandes de visa pour émigrer aux États-Unis avec sa femme Malka ayant échoué, malgré le soutien de son entourage, le couple décide en mars 1943 de fuir en Italie. Arrêtés à la frontière, ils sont tous deux déportés en camp de concentration. Malka, enceinte, y meurt. Naftali survit. Après un an de convalescence dans un hôpital parisien, il soutient sa thèse à Lille le 3 juillet 1946 – une thèse d'université car il n'a pas obtenu la dispense de la licence nécessaire pour une thèse d'État. Cette thèse porte sur les spectres de Fourier et les relations entre fonctions de corrélation des fluctuations, et sur les coefficients de diffusion; elle est résumée dans cinq articles des *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences* et publiée dans un rapport pour le GRA plus tard traduit en anglais par le NACA [26, 27]. Quelques mois après sa soutenance, Frenkiel émigre aux États-Unis où il deviendra une figure de premier plan de la mécanique des fluides américaine. Il fondera notamment, en 1958, le journal *The Physics of Fluids*.

6.5. *L'après-guerre*

Après sa démission en 1945, Kampé de Fériet se consacre pleinement à ses recherches sur la turbulence et les phénomènes aléatoires. Il effectue de nombreux séjours dans les universités américaines où ses travaux sont bien reconnus – ils sont cités dans les ouvrages de référence sur la turbulence. Il est élu en 1953 correspondant de l'Académie des sciences de Paris. Martinot-Lagarde lui succède à la direction de l'IMFL, maître de conférences non docteur – il ne soutiendra sa thèse qu'en 1958. Privé de véritable leader scientifique, l'institut traverse dans les années suivantes une histoire mouvementée, balloté entre l'ONERA (qui se substitue au GRA comme gérant de l'IMFL) et l'université de Lille.

7. L'institut de mécanique des fluides de Marseille

7.1. *Les années trente*

Troisième ville française, Marseille est au début du xx^e siècle un port important et une grande cité universitaire. Son histoire aéronautique est marquée par le premier vol d'un hydravion, réalisé en 1910 par Henri Fabre sur l'étang de Berre. Plusieurs constructeurs aéronautiques se sont ensuite installés dans la région, et la « gare aérienne » de Marignane, inaugurée en 1922, offre des liaisons commerciales vers Alger, Beyrouth et Saïgon. Cette situation lui vaut d'être retenue par le ministère de l'Air, en 1930, pour la création d'un institut de mécanique des fluides. Joseph Pérès, titulaire de la chaire de mécanique rationnelle et appliquée, en est nommé directeur. Un poste de chef de travaux fondé par le ministère de l'Air est attribué à Jacques Valensi (1903-1992), ingénieur de l'École centrale de Paris. Lucien Malavard, étudiant à la faculté des sciences, est nommé collaborateur scientifique du ministère de l'Air, faisant fonction d'assistant. Un certificat de mécanique des fluides est ouvert, suivi dans les années suivantes par une douzaine d'étudiants. L'institut de Marseille, comme celui de Lille, participe à de nombreuses manifestations publiques de promotion de l'aéronautique.

Installés dans l'immeuble de l'ancienne faculté des sciences, sur la Canebière, Pérès et Malavard initient des recherches sur l'analogie rhéoélectrique des écoulements potentiels autour d'obstacles. Ils résolvent en particulier, pour une aile d'envergure finie, l'écoulement secondaire dans le plan normal à l'écoulement principal – problème où doit être traduite électriquement une condition à la limite sur l'aile, intégral-différentielle, établie par Prandtl. La figure 16 montre, pour différentes incidences, la distribution de la portance le long de l'aile [28]. Valensi poursuit de son côté des recherches sur l'aérodynamique des hélices au service des recherches de l'Aéronautique à Issy-les-Moulineaux, et engage à Marseille la construction d'une soufflerie et d'un tunnel hydrodynamique.

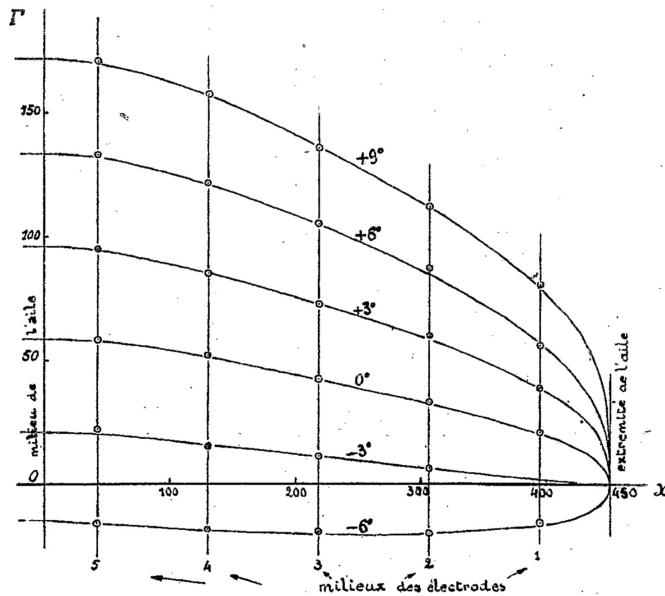


FIGURE 16. Distribution de la circulation selon l'envergure d'une aile, pour six incidences, déterminée par la méthode rhéoélectrique (—) et par le calcul (o) [28].

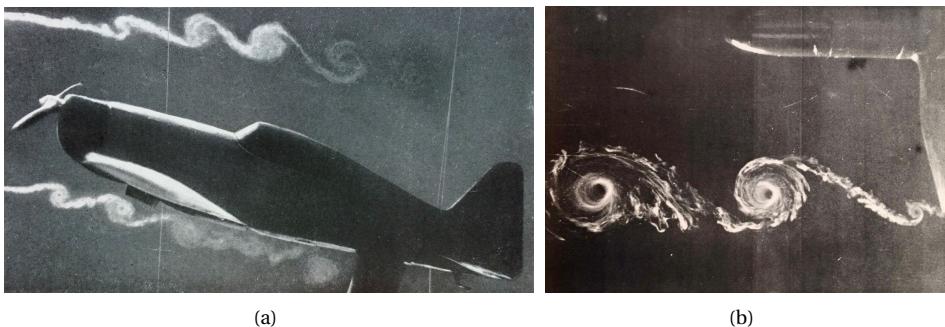


FIGURE 17. (a) Tourbillons marginaux générés à l'extrémité de l'hélice d'une maquette de Morane 406; (b) Tourbillons générés par une hélice marine [29].

Pérès quitte Marseille en 1932 pour la Sorbonne (cf. § 5.4), accompagné de Malavard. Son successeur à la direction de l'IMFM, le mathématicien André Marchaud, obtient un terrain et les subventions nécessaires pour établir l'institut dans des locaux propres, à proximité de la gare Saint-Charles. Valensi poursuit ses travaux sur la visualisation en soufflerie d'écoulements autour de maquettes (ailes et hélices aériennes, avions complets) en collaboration avec les constructeurs aéronautiques (figure 17), et soutient sa thèse à la Sorbonne en 1935. Son poste de chef des travaux est alors transformé en maîtrise de conférences.

Alexandre Favre (1911-2005), nouvel assistant, travaille à la détermination détaillée du champ des vitesses autour d'obstacles placés dans un « tunnel hydrodynamique de Toussaint-Carafoli » réalisant un écoulement plan [30]. Le champ des vitesses est obtenu à partir de filets de colorant émis par une rampe oscillante à l'amont de l'obstacle. À partir de ces vitesses et de leurs

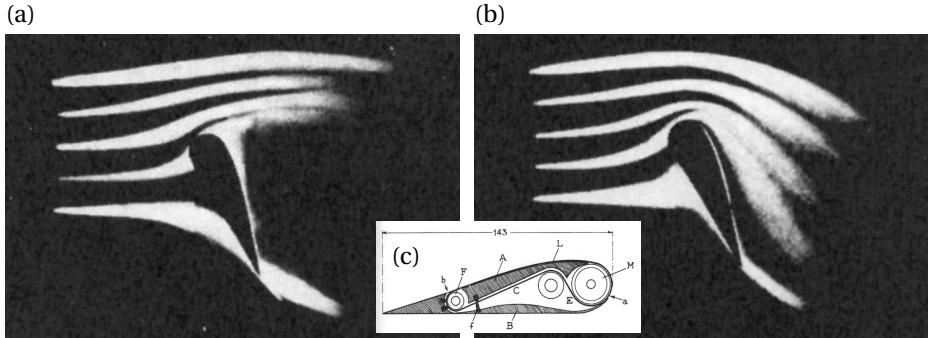


FIGURE 18. (b) Écoulement autour d'un aileron à paroi d'extrados mobile pour une incidence de 60° ; (a) vitesse de la courroie nulle; (b) vitesse de la courroie égale à celle de l'air; (c) schéma de l'aileron [31].

gradients, Favre peut ainsi évaluer aux différents points (près de 600!) la valeur numérique de chacun des termes de l'équation de Navier-Stokes. Une autre partie de sa thèse porte sur un procédé « hypersustentateur » destiné à prévenir le décollement de l'écoulement, mettant en œuvre, sur l'extrados de l'aile, une paroi mobile à la vitesse de l'écoulement (figure 18 (b)). Des forces de portance élevées peuvent ainsi être obtenues. Favre soutient sa thèse en 1938 [31]. Dans l'attente d'un poste universitaire, il travaille ensuite pour la société nationale de construction de moteurs à Argenteuil (usines Hispano-Suiza). Il y conçoit un compresseur centrifuge supersonique résolvant le problème de l'alimentation des premiers turboréacteurs d'avion. La guerre avec l'Allemagne déclarée, l'invention est envoyée en Angleterre pour éviter qu'elle ne tombe entre les mains de l'ennemi. On la retrouvera après la guerre dans les premiers turboréacteurs britanniques ainsi que dans les séparateurs isotopiques du CEA à Pierrelatte.

Nommé recteur, Marchaud quitte Marseille en 1938, remplacé à la direction de l'institut par le mathématicien René Thiry (1886-1968). Celui-ci arrive de Strasbourg où, après une thèse sous la direction de Villat, il a monté un centre d'enseignement de la mécanique des fluides à la faculté des sciences. Thiry achève pendant la guerre, avec le soutien du GRA, l'installation de l'institut à Saint-Charles et la construction de la grande soufflerie. Valensi, de confession juive, est démis de son emploi de maître de conférences par le gouvernement de Vichy en décembre 1940. Il poursuit néanmoins, bénévolement, l'installation de la soufflerie pendant une année. Recherché par la Gestapo, il émigre ensuite à Londres. Il est remplacé sur son poste par Louis Sackmann, ancien collaborateur de Thiry à Strasbourg. Favre, de retour à Marseille après l'Armistice, oriente son enseignement et ses recherches vers la turbulence et la mécanique de l'atmosphère, avec le concours de l'ONM. Il noue des relations avec le Centre de Recherches Scientifiques, Industrielles et Maritimes de Marseille (CRSIM, qui deviendra le laboratoire de mécanique et d'acoustique).

7.2. L'après-guerre

À la Libération, Valensi est réintégré dans sa maîtrise de conférences, transformée en 1947 en chaire de mécanique des fluides toujours financée par le ministère de l'Air. Il prend la direction de l'institut suite au départ de Thiry à la Sorbonne. L'emploi de chef de travaux associé à la chaire est attribué à Claire Clarion qui soutient en 1954 une thèse sur les oscillations d'un fluide dans un tube en U, travail réalisé en collaboration avec Théodore Vogel du CRSIM (Claire Clarion sera chercheuse au CNRS puis professeure).

La grande soufflerie entre en service en 1948 – sa veine d'essai elliptique a pour section $3,3 \times 2,2 \text{ m}^2$. L'activité de l'institut, fortement soutenue par l'ONERA et par l'industrie, s'oriente vers

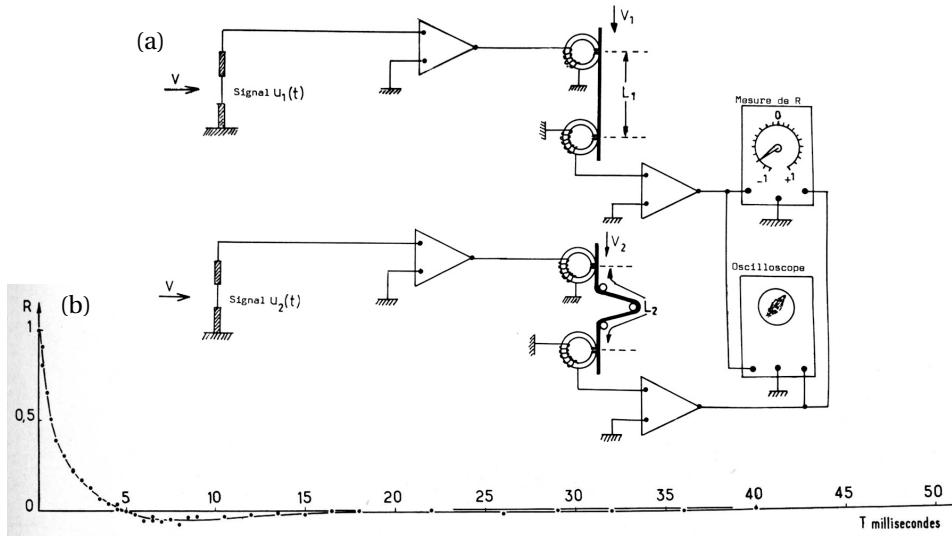


FIGURE 19. (a) Schéma du dispositif de calcul de la corrélation entre deux signaux $u_1(t)$ et $u_2(t)$. (b) Coefficient de corrélation temporelle des fluctuations longitudinales de vitesse dans une couche limite [32].

les écoulements instationnaires (grilles d'aubes de compresseurs, turbomachines, pales d'hélicoptères) et vers les écoulements supersoniques. Un service de calcul sur machines électriques est créé par André Papon, assistant. Une collaboration avec le CRSIM porte sur la métrologie par ultra-sons.

Favre crée en 1947 un nouveau laboratoire de mécanique de l'atmosphère et météorologie, installé dans une chapelle désaffectée cédée par la préfecture et située à proximité du CRSIM. Sa maîtrise de conférences est transformée en chaire, financée par le ministère de L'Air. La turbulence devient sa thématique principale de recherche. Soutenu par l'ONERA et le CNRS, il développe avec Jean Gaviglio le calcul des corrélations de vitesse à partir d'anémomètres à fil chaud. La figure 19(a) en montre le principe : les deux signaux à corrélérer (mesurés au même point ou en deux points différents) sont enregistrés sur bande magnétique et relus avec un retard L_1/V_1 et L_2/V_2 , où V_1 et V_2 sont les vitesses des bandes et L_1 et L_2 les distances entre les têtes d'enregistrement et de lecture. Les signaux sont ensuite multipliés et intégrés électroniquement. La variation du décalage temporel est obtenue en déplaçant un galet entre les têtes magnétiques. La figure 19(b) montre le coefficient de corrélation ainsi obtenu pour les fluctuations longitudinales de vitesse dans une couche limite.

8. L'institut de mécanique des fluides de Toulouse

8.1. Création

La création d'un institut de mécanique des fluides à Toulouse est motivée par deux raisons. La première est la présence dans cette ville des constructeurs aéronautiques Latécoère et Dewoitine et du siège de la célèbre *Compagnie générale aéropostale* (où s'est notamment illustré l'aviateur et romancier Antoine de Saint-Exupéry). La seconde tient à la réputation du laboratoire d'hydraulique de l'institut électrotechnique de la faculté des sciences (*cf.* § 4.3). Le nouvel institut aura pour mission particulière l'étude des coques d'hydravions – spécialité de Latécoère qui inaugure alors une liaison aérienne régulière entre New York et l'étang de Biscarrosse sur la côte Aquitaine.

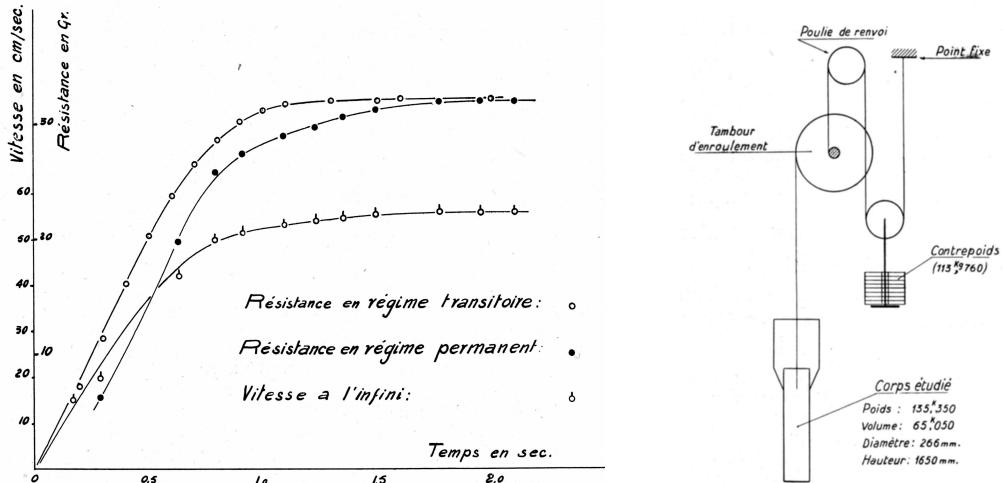


FIGURE 20. (a) Dynamique d'un corps accéléré par la gravité dans l'eau : vitesse du corps (○), traînée instantanée mesurée (○), et traînée en écoulement stationnaire à la même vitesse (●). (b) Machine d'Atwood permettant la variation du poids apparent et de la vitesse terminale de l'obstacle [33].

L'institut est créé en novembre 1930 et sa direction est confiée à Charles Camichel, directeur de l'Institut électrotechnique (IET). Une maîtrise de conférences de mécanique des fluides, fondée par le ministère de l'Air, est attribuée à Léopold Escande (1902-1980), brillant étudiant de l'IET. L'Air finance également un ouvrier mécanicien et un ingénieur, Jean Baubiac, qui s'engage dans la préparation d'une thèse de doctorat. Pour l'enseignement, un certificat de mécanique des fluides est ouvert aux étudiants de la faculté, comme dans les autres instituts, tandis qu'une mention mécanique des fluides est créée dans le diplôme d'ingénieur mécanicien de l'IET.

8.2. Recherches

En dépit de la crise économique du début des années trente et de la chute du nombre d'étudiants, le nouvel institut démontre un dynamisme scientifique dans la continuité de celui de l'ancien laboratoire d'hydraulique. Aux cinq thèses de doctorat ès sciences soutenues entre 1929 et 1931 (cf. § 4.3), viennent s'ajouter deux autres thèses en 1936, sur les sillages des corps immersés (J. Baubiac) et sur les phénomènes transitoires et oscillatoires en mécanique des fluides (É. Crausse, boursier de la Caisse nationale des sciences). Une dernière thèse est soutenue avant la guerre sur les allées tourbillonnaires de Bénard-Kármán (L. Castagnetto).

La figure 20 illustre l'effet d'une accélération d'un corps immersé sur la force de traînée. Le corps, ici un cylindre de masse 135 kg et de longueur 1,65 m, est lâché d'un radeau installé sur un lac Pyrénéen profond, une machine d'Atwood permettant de modifier son poids apparent (lequel commande la vitesse terminale). Il apparaît qu'à un instant t du mouvement où la vitesse est $V(t)$, la traînée est supérieure à celle que subirait l'obstacle à la même vitesse V constante (contrôlée par la machine d'Atwood). Cette expérience illustre de façon frappante l'effet « de masse ajoutée » lié à l'inertie du fluide.

La figure 21 montre le développement de tourbillons dans le sillage d'une plaque normale à l'écoulement. La partie supérieure de la figure montre la croissance du tourbillon de démarrage puis l'apparition de « tourbillons secondaires » (de Kelvin-Helmholtz) sur la « surface de discontinuité », fortement cisaillée, séparant le sillage de l'écoulement externe. La partie inférieure de

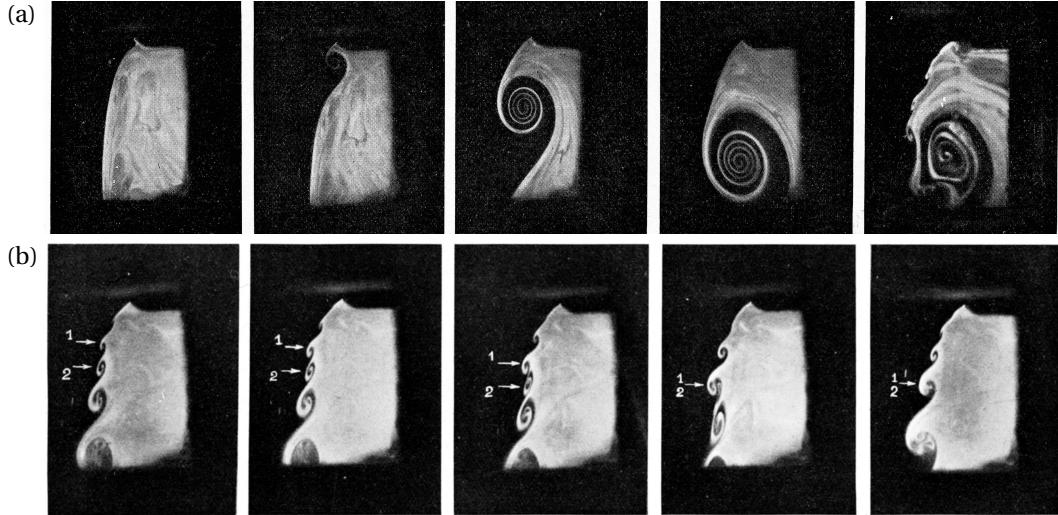


FIGURE 21. (a) Développement d'un tourbillon de démarrage dans le sillage d'une plaque, et apparition des « tourbillons secondaires »; (b) appariement des tourbillons secondaires [34, 35].

la figure montre la croissance vers l'aval des tourbillons secondaires, et l'avalement de l'un d'eux par celui qui le suit (phénomène d'appariement).

La figure 22 est relative à la question de la transition à la turbulence de l'écoulement dans un tube. La transition étant provoquée par un incrément soudain du débit au-delà de sa valeur critique, on s'intéresse au temps de relaxation vers sa valeur terminale de la vitesse moyenne sur l'axe. Il apparaît sur la figure que ce temps de relaxation est d'autant plus grand que le nombre de Reynolds terminal est proche de sa valeur critique. Ainsi que l'explique Baubiac, cette divergence du temps de relaxation offre une définition précise de la transition. L'analyse est ici menée dans des termes très proches de ceux avec lesquels, plus tard, on rendra compte des phénomènes critiques.

La dynamique transitoire des oscillations de sillage fait l'objet du même type d'études. La croissance et la saturation de l'amplitude des oscillations sont interprétées dans le cadre de l'équation de Van der Pol (publiée en 1927 pour rendre compte des auto-oscillations électriques). D'autres études portent sur la vibration, induite par un écoulement transverse, de fils tendus ou de tiges encastrées à une extrémité. Ces vibrations, couplées au lâcher de tourbillons dans le sillage, font apparaître des phénomènes de quasi-périodicité et d'accrochage de fréquence. Mentionnons pour terminer ce bref panorama la vérification expérimentale à grande échelle, dans le canal d'amenée d'une usine hydroélectrique ($Re \approx 10^7$), du profil logarithmique de vitesse établi en 1930 par Prandtl et von Kármán.

Charles Camichel, correspondant de l'Académie des Sciences depuis 1922, en est élu membre en 1936. La maîtrise de conférences d'Escande est transformée l'année suivante en chaire de mécanique des fluides. Un panorama des recherches menées dans l'entre-deux-guerres est présenté par Camichel et Escande en 1938, dans un volumineux mémoire (356 pages) des *Publications Scientifiques et Techniques* (PST) du ministère de l'Air [36]. Un trait commun remarquable de ces recherches est, d'une part, le fil conducteur de l'analyse dimensionnelle (la similitude), et d'autre part la finesse de l'expérimentation, qui permet d'atteindre une résolution spatiale inférieure au millimètre et une résolution temporelle de quelques microsecondes.

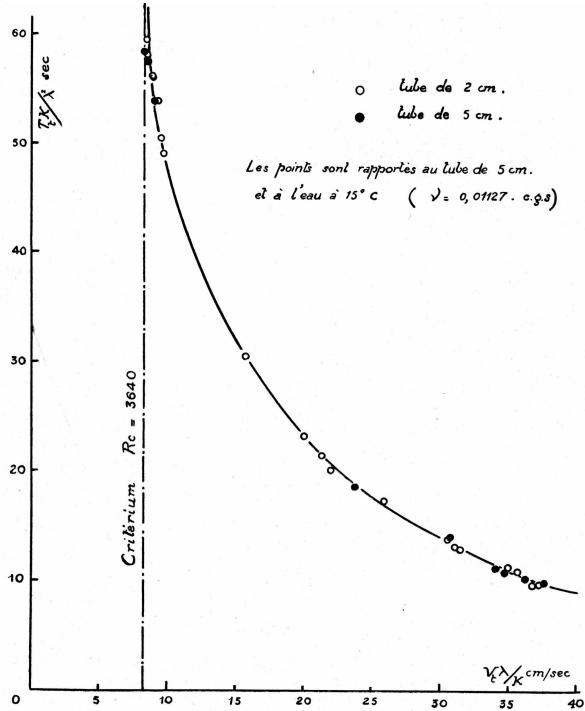


FIGURE 22. Transition à la turbulence en tube : temps de relaxation de la vitesse moyenne sur l'axe du tube, suite à un incrément du débit à partir d'une valeur sous-critique, fonction du nombre de Reynolds terminal. Les mesures pour le tube de 2 cm sont mises à l'échelle du tube de 5 cm selon la similitude de Reynolds (λ et κ sont les rapports des diamètres et des viscosités cinématiques) [33].

8.3. Études aérodynamiques en soufflerie

Une grande soufflerie aérodynamique, dont la construction a été décidée par le ministère de l'Air en 1935, est mise en service en 1938 sur une nouvelle parcelle de terrain cédée par la Ville. Sa veine d'essai a un diamètre de 2,4 m et la vitesse de l'air y atteint 40 m/s. Dans le contexte de l'imminence de la guerre, cette soufflerie connaît immédiatement une importante activité, pour les constructeurs Latécoère et Dewoitine et pour le service de recherches de l'Aéronautique. L'activité croît considérablement en 1940 avec le repliement à Toulouse des services de l'Aéronautique et de l'institut aérotechnique de Saint-Cyr (deux équipes se relaient quotidiennement pour les essais). Cette activité se maintient au début de la guerre et pendant l'occupation allemande après novembre 1942 (la soufflerie produit cette année-là 150 rapports d'études). Les essais sont cependant interrompus en juillet 1943 par la destruction du ventilateur – vraisemblablement une action de la Résistance. Les essais ne reprennent que dix mois plus tard.

L'institut de mécanique des fluides de Lille, réinstallé à proximité de l'institut électrotechnique (cf. § 6.4), semble avoir eu peu de relations avec son homologue toulousain (la semi-clandestinité de l'institut de Lille n'a laissé quasiment aucune trace dans les archives toulousaines). Ces relations semblent s'être limitées à deux conférences de Kampé de Fériet sur la turbulence, et à quelques expériences de diffusion turbulente réalisées par Frenkiel à la soufflerie de Banlève.

Camichel prend sa retraite en 1941 et Escande lui succède à la direction de l'institut électrotechnique et de l'institut de mécanique des fluides. L'équipe réunie par Camichel alors se dis-

perse. En 1943, Escande, pressé de répondre aux sollicitations du ministère des Ponts et Chaussées, obtient de la municipalité une nouvelle extension du terrain de Banlèvre. Il y établit, avec son assistant Louis Castex, un « laboratoire plat » en plein air pour les études d'ouvrages sur modèles réduits.

8.4. *L'après-guerre*

L'hydroélectricité, qui représente dans l'après-guerre la moitié de la production nationale d'électricité, est alors une industrie en plein essor. Escande, devenu un spécialiste des ouvrages hydrauliques pour cette industrie (chambres d'équilibre des conduites forcées, déversoirs, évacuateurs de crues, prises d'eau, barrages mobiles, etc.), y engage toute l'activité de l'IMFT durant deux décennies. Sa réputation déborde les frontières nationales et il multiplie les études et expertises sur les cinq continents. Il est secondé par deux ingénieurs de l'IET, Louis Castex (1913-1986), directeur technique, et Jean Nougaro (1922-2008). Celui-ci soutient en 1952 une thèse de doctorat sur les vagues déferlantes dans les canaux à surface libre.

À la création des Écoles nationales supérieures d'ingénieurs (ENSI) en 1947, Escande obtient la transformation de l'institut électrotechnique en École Nationale Supérieure d'Électrotechnique et d'Hydraulique de Toulouse (ENSEHT). Honoré de nombreuses distinctions académiques (de *docteur honoris causa* en particulier), il est élu membre de l'Académie des sciences en 1954. Revers de la médaille, l'orientation technique donnée par Escande à l'IMFT entraîne la disparition de la culture scientifique, plus ouverte aux questions fondamentales, construite par Camichel, et la perte associée du savoir-faire expérimental. Un net renouveau scientifique se manifestera à la fin des années soixante avec l'arrivée d'une jeune génération qui renouvellera les thématiques de recherche, autour des transferts dans les milieux poreux, des écoulements environnementaux, et des écoulements diphasiques.

9. Les centres annexes d'enseignement

Le programme du ministère de l'Air, de développement de la mécanique des fluides universitaire, va permettre l'émergence, en plus des instituts discutés ci-dessus, de « centres annexes d'enseignement » dans cinq facultés des sciences. Il n'y aura dans ces centres ni fondation de chaire ni construction de grande soufflerie, au moins jusqu'à la guerre, mais des financements d'enseignements complémentaires et d'emplois de collaborateurs scientifiques dont beaucoup soutiendront une thèse de doctorat.

9.1. *Le centre de Strasbourg*

Au lendemain de la Première Guerre mondiale, Strasbourg redevenue française est l'objet de toutes les attentions nationales, et devient en particulier un important centre universitaire pour les mathématiques. La ville accueille en 1920 le Congrès international de mathématiques, dont l'organisation est confiée à Henri Villat. Entre 1918 et 1930, la faculté de Strasbourg décerne quatre des sept doctorats en mathématiques préparés en province [74, § 3.1]. Ce dynamisme engage le ministère de l'Air à y créer en 1930 un centre d'enseignement de mécanique des fluides. René Thiry (1886-1968), ancien étudiant de Villat et titulaire de la chaire de mécanique rationnelle, correspondant de l'Académie des sciences, prend la responsabilité du centre, assisté par Louis-André Sackmann (1905-1990). Charles Sadron (1902-1993), agrégé de physique préparant une thèse sous la direction de Pierre Weiss, est nommé collaborateur scientifique et dispense les enseignements de mécanique expérimentale. Thiry, mathématicien ouvert à l'expérimentation,

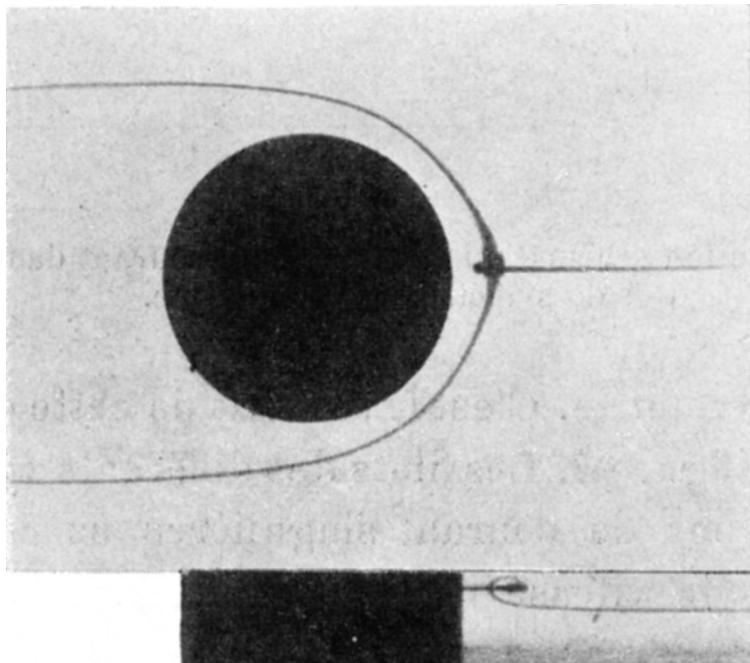


FIGURE 23. Visualisation, par Sackmann et Thiry, de l’écoulement confiné entre deux plaques à l’amont d’un obstacle cylindrique. On notera, sur la photo du bas, l’enroulement sur elle-même de la ligne de colorant avant sa division en deux branches [37].

se dit « passionné par les questions de mécanique, à condition que celles-ci soient envisagées sous leur véritable aspect réel et physique et ne servent pas de simples prétextes à des développements mathématiques ». Il participe ainsi activement, avec ses deux collègues, à l’installation d’un laboratoire de mécanique des fluides dans le vaste Palais universitaire qui abrite la faculté des sciences.

Les travaux de Sackmann, qui soutient une thèse d’État en 1936, portent sur la structure des écoulements confinés autour d’obstacles. La figure 23 montre, à titre d’exemple, l’enroulement d’une ligne de courant sur elle-même à l’amont d’un cylindre, puis sa division en deux branches à l’aval du point d’arrêt. Sackmann monte ensuite, avec Sadron, une petite soufflerie pour des essais aérodynamiques sur des maquettes.

Sadron quant à lui soutient sa thèse en 1932, puis, ayant obtenu une bourse de la fondation Rockefeller, rejoint le nouveau laboratoire de von Kármán au *California institute of technology*. Il y participe à l’étude des couches limites turbulentes et met au point une technique optique de vélocimétrie fondée sur la biréfringence de certains liquides placés dans un gradient de vitesse. Il découvre alors les propriétés avantageuses, du point de vue de la biréfringence, des macromolécules. De retour à Strasbourg en 1932, il est recruté comme chargé de recherche par la Caisse nationale de la recherche scientifique (CaNRS), au laboratoire de mécanique des fluides, et publie la première étude française sur la couche limite turbulente [38–40]. Dans une lettre à von Kármán, il se plaint à ce propos du « torpillage » de son projet d’ouvrage sur la turbulence par « des hommes influents dans l’université française » [63, p. 463] où l’on devine sans peine une allusion à Villat. Sadron s’orientera par la suite vers la physique des macromolécules et des colloïdes dont il sera un pionnier français.

Thiry quitte Strasbourg en 1938 pour prendre la direction de l'institut de mécanique des fluides de Marseille. Il y est rejoint l'année suivante par Sackmann, tandis que Sadron accompagne le repli général à Clermont-Ferrand de l'université de Strasbourg.

De retour à Strasbourg à la Libération, Sackmann réinstalle le laboratoire de mécanique des fluides dans de nouveaux locaux rue Boussingault (l'immeuble d'une École du pétrole transférée dans la région parisienne). Il y oriente les recherches vers l'hydraulique des canalisations et des fonds érodables (un dispositif anti-affouillement au pied des piles de pont est breveté), et vers le sujet plus fondamental de la transition à la turbulence étudiée selon une approche statistique novatrice des bouffées turbulentes. Son assistant F. Debeauvais étudie la pulvérisation des carburants dans les carburateurs [41, p. 167-198]. Le laboratoire est par la suite transformé en institut de mécanique des fluides. Dans les années soixante, l'activité de Sackmann porte principalement sur les transferts en milieux poreux, l'hydrologie et la pollution des eaux souterraines. Il réalise d'importantes études sur la nappe phréatique rhénane [42].

9.2. *Le centre de Poitiers*

L'université de Poitiers est réputée dans les années vingt pour les mathématiques, dominées par la personnalité de Georges Bouligand (1889-1979), titulaire de la chaire de mécanique rationnelle et appliquée [74, § 3.2]. Ce contexte décide le ministère de l'Air à y implanter en 1930 un centre d'enseignement de la mécanique des fluides. Le conseil général de la Vienne, la municipalité et la chambre de commerce apportent des subventions. Les enseignements théoriques sont dispensés par Bouligand puis par Louis Got, la mécanique expérimentale des fluides par le professeur de physique Albert Grumbach, et les travaux pratiques sont encadrés par un collaborateur scientifique du ministère de l'Air.

Bouligand parti à la Sorbonne, il est remplacé en 1938 par Henri Poncin (1904-1994), ancien étudiant de Villat, qui obtient l'année suivante la chaire de mécanique rationnelle et appliquée. Un nouveau poste de chef des travaux, financé par l'Air, est attribué à Charles Chartier (né en 1905), ancien étudiant de Foch au laboratoire de Bénard. Poncin et Chartier montent en 1942 un laboratoire de mécanique des fluides, bientôt équipé d'un canal hydrodynamique, d'une soufflerie Eiffel et d'une soufflerie supersonique. Chartier y poursuit ses travaux sur la chronophotographie stéréoscopique en les orientant vers les applications aéronautiques.

En 1945, Poncin fédère les deux laboratoires de mécanique des fluides et de mécanique des solides dans un même Institut de Mécanique et d'Aéronautique de Poitiers (IMAP). Ces laboratoires sont dirigés par Chartier et par Raymond Jacquesson, tous deux promus professeurs en 1949. Dans le mouvement de création des ENSI, Poncin fonde en 1948 l'École Nationale Supérieure de Mécanique et d'Aéronautique (ENSMA) – une vingtaine de places est offerte au concours d'entrée dans les années suivantes. La même année, Poncin obtient la maîtrise de conférences de mécanique théorique des fluides à la Sorbonne, sans quitter l'ENSMA qu'il continue de diriger. Robert Mazet le remplace sur la chaire de mécanique rationnelle et prend la direction de l'IMAP. L'ENSMA, qui forme des ingénieurs, et l'IMAP, qui subsiste comme institut de faculté, sont relogés dans les bâtiments de l'ancienne caserne Dalesme. Ces bâtiments, rénovés, hébergent également un nouvel Institut de recherches scientifiques et techniques du Centre-Ouest, à vocation plus appliquée. C'est dans cet institut qu'est remontée, en 1948, la grande soufflerie à section octogonale construite à Toulouse par l'institut de Lille (cf. § 6.4) – cette soufflerie, aujourd'hui installée à l'institut Pprime y fonctionne toujours. Du côté de l'enseignement, le certificat de mécanique des fluides est suivi dans l'après-guerre par une quarantaine d'étudiants avec un taux de réussite de l'ordre de 50 %.

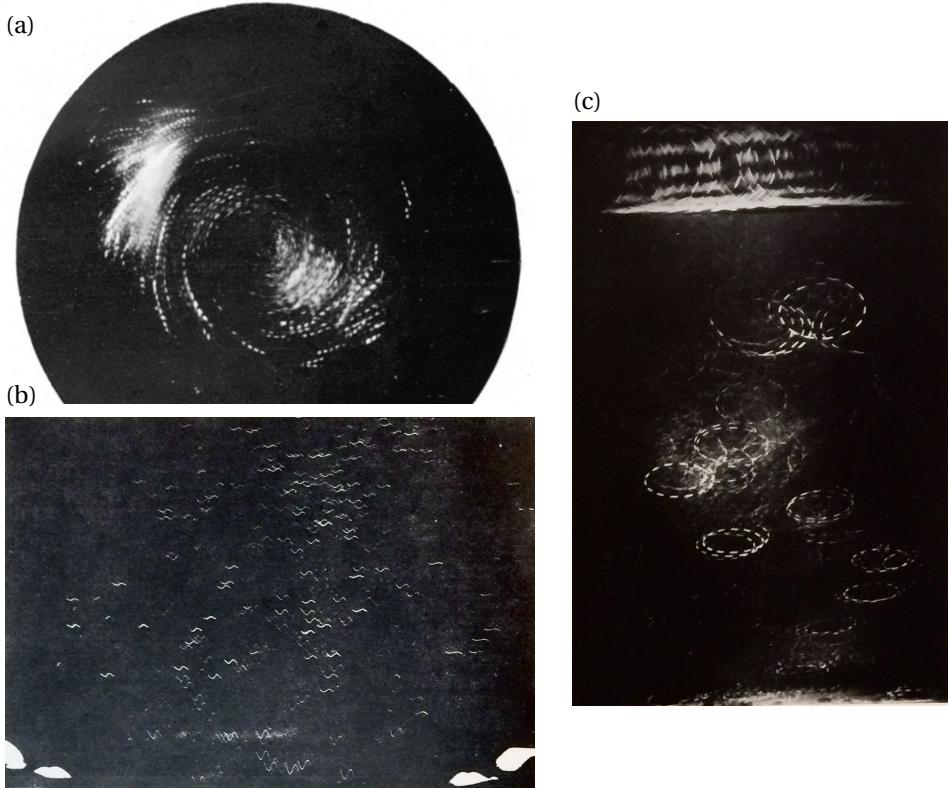


FIGURE 24. Visualisations d'écoulements par chronophotographie au laboratoire de mécanique des fluides de Poitiers : (a) section d'un tourbillon de bout d'aile en soufflerie; (b) champ de vitesses au voisinage d'un haut-parleur avec flou de bougé latéral; (c) mouvement orbital sous une onde de surface. [41, p. 139-165].

Joseph-Maurice Bourot, étudiant de Chartier, soutient en 1949 une thèse sur la chronophotographie des champs aérodynamiques. Il intègre le CNRS comme chargé de recherche et oriente ses travaux vers la dynamique des particules en suspension dans les gaz et vers les écoulements à grande vitesse. La figure 24(a) montre la section d'un tourbillon de bout d'aile, visualisé par de puissantes lampes à décharge et un temps de pose photographique très court – une fraction de milliseconde. L'expérience est réalisée dans une grande soufflerie cédée par le constructeur aéronautique Nieuport. Bourot travaille également sur la visualisation des ondes acoustiques. La figure 24(b) montre l'écoulement au voisinage d'une membrane de haut-parleur, où un flou de bougé latéral permet d'étaler le mouvement des particules traceuses et d'accéder ainsi à leur dynamique. D'autres études du laboratoire portent sur les écoulements à surface libre (figure 24(c)). Pierre Couvertier, autre étudiant de Chartier, assistant, soutient en 1953 une thèse d'État sur l'application des décharges électriques à l'exploration des écoulements gazeux aux grandes vitesses.

En 1949, Raymond Siestrunk (1919-2005), ancien étudiant de Pérès, est nommé maître de conférences à l'ENSMA où il poursuit ses études sur les écoulements hélicoïdaux dans les turbomachines. Son camarade Paul Germain (1920-2009), nommé lui aussi maître de conférences, mène des études sur les écoulements supersoniques et transsoniques, en collaboration avec Pérès et l'ONERA. En 1953, Germain obtient un poste de professeur à Lille où il a noué des relations avec Gérard Gontier [75]. Jean-Jacques Moreau (1923-2015), chercheur au CNRS, poursuit des recherches d'hydrodynamique théorique avec singularités. Nommé professeur à Montpellier en 1958, il y fonde le Groupe d'analyse convexe qui préfigure le Laboratoire de mécanique

et génie civil (LMGC). Moreau sera une grande figure de la mécanique « non régulière » traitant de lois de comportement non différentiables pour des problèmes de contact unilatéral, de contact avec frottement, de chocs ou de plasticité [76].

À l’Institut de recherches du Centre-Ouest, se développent des études d’aérodynamique et d’aérothermique avec Henri Cordier, adjoint au directeur de l’ENSMA, Adrien Saigne, directeur technique, et Raymond Goethals, assistant arrivé de l’IAT de Saint-Cyr. Le développement des laboratoires d’aérodynamique et d’aérothermique entraîne la création en 1953 d’une annexe sur un vaste terrain à l’ouest de Poitiers, à proximité de l’aérodrome, pour les études techniques et pour la formation pratique des élèves-ingénieurs. Cette annexe voit ses moyens d’essais et son budget croître considérablement, au point d’être en 1962 détachée de l’ENSMA et constituée en institut d’université, sous le nom de Centre d’Études Aérodynamiques et Thermiques (CEAT) de Poitiers [77]. Goethals en sera l’un de ses directeurs.

9.3. *Le centre de Nantes*

Le centre de Nantes créé en 1930 est appuyé sur l’Institut polytechnique de l’Ouest (IPO) [78]. Cet institut a été fondé par la Ville en 1919 à l’initiative de Aymé Poirson, ingénieur de l’École supérieure de l’aéronautique, et a été rattaché en 1922 à la faculté des sciences de Rennes – l’université de Nantes, supprimée en 1793 par la Convention comme toutes les universités françaises, ne sera réouverte qu’en 1962. L’IPO forme des techniciens et des ingénieurs dans les domaines de la mécanique, de l’électricité, de la chimie, et des travaux publics. Une année de spécialisation en construction navale est ouverte en 1925 pour les ingénieurs diplômés (correspondant à une quatrième année d’études), en relation avec les besoins de l’industrie régionale – restée jusqu-là assez indifférente à la question de la formation de ses ingénieurs. L’industrie de la construction navale connaît alors un virage vers l’aéronautique, lié, d’une part, à une chute de l’activité navale, et d’autre part à l’essor de compagnies aériennes cherchant à calquer leur organisation sur celle de leurs homologues maritimes (L’Association technique maritime devient ainsi en 1924 l’Association technique maritime et aéronautique, et Louis Breguet, notamment, entre dans son conseil d’administration).

Les enseignements de mécanique des fluides créés en 1930 sont assurés par Marcel Légaut, maître de conférences de mathématiques à la faculté des sciences de Rennes, et par Paul Le Rolland, maître de conférences en mécanique physique affecté à l’IPO. Émile Ravilly, ingénieur IPO dans la spécialité des constructions navales, y est nommé collaborateur scientifique du ministère de l’Air, faisant fonction d’assistant, sur un programme de recherche portant sur la photoélasticité. L’Aéroclub de l’Atlantique est associé aux enseignements et fournit en particulier du matériel pour les travaux pratiques.

Les recherches engagées portent sur les structures aéronautiques et leurs assemblages, et sur les propriétés mécaniques et physico-chimiques des matériaux (vernis, caoutchoucs, bois, alliages légers). L’industrie régionale demeure cependant peu impliquée [78, chap. 9]. Dans les années trente, deux thèses sont soutenues sous la direction de Le Rolland, sur les dislocations dans les cristaux induites par la fatigue de torsion, et sur l’anisotropie de dureté des cristaux. Jean Luneau, chef d’un nouveau laboratoire de mécanique des fluides, travaille sur la résistance aérodynamique et développe la vélocimétrie par fil chaud. Ravilly monte un bassin pour l’étude des carènes de navires.

À la veille de la Seconde Guerre mondiale, les études s’orientent vers la défense nationale à la demande du Centre national de la recherche scientifique appliquée (CNRSA). Dirigé par Le Rolland depuis 1934, l’IPO devient dès 1940 un foyer de la Résistance à l’occupant allemand. Après la guerre, l’IPO est l’un des huit instituts universitaires transformés en ENSI et devient l’École nationale supérieure de mécanique (ENSM). Entre 1950 et 1954, quatre maîtrises de conférences

y sont créées, en mathématiques appliquées, mécanique des fluides, chimie appliquée, et physique. La recherche, gravement affectée au lendemain de la guerre par le départ de Le Rolland et de Pierre Liénard, reprend avec la création, en 1957, d'une chaire de mécanique des fluides (Ravilly) et de deux maîtrises de conférences en mécanique appliquée (Yves Pironneau, précédemment à Poitiers) et en électrotechnique (Romane Mézencev, précédemment à Toulouse). Le calcul numérique fait son entrée en 1959 avec l'acquisition par Ravilly d'un ordinateur IBM 650. Pierre Guével (1929-2007), ingénieur de l'ENSEH de Toulouse et auteur d'une thèse sur les écoulements dans les milieux poreux, succède à Ravilly en 1975 à la tête du laboratoire de mécanique des fluides.

9.4. *La mécanique des fluides à Caen, Lyon, et Grenoble*

9.4.1. *Caen*

La faculté des sciences de Caen, contactée par le ministère de l'Air en 1929, crée un enseignement de mécanique des fluides l'année suivante. Cet enseignement est pris en charge par Ludovic Zoretti, professeur de mécanique rationnelle et appliquée et fondateur de l'institut technique de Normandie. Zoretti est secondé par J. Lemains, collaborateur scientifique de l'Air, qui soutient en 1934 une thèse de doctorat d'État sur les pertes de charges au travers de grilles et de filtres. Les cours sont suivis par les élèves-ingénieurs de l'institut technique de Normandie, et quelques certificats de mécanique des fluides sont délivrés. À la fin des années trente, Zoretti, leader socialiste de la SFIO et syndicaliste CGT, dérive vers le fascisme; condamné à la Libération pour collaboration avec l'Allemagne, il meurt en prison en 1948.

9.4.2. *Lyon*

La faculté des sciences de Lyon, contactée par le ministère de l'Air, ne semble pas avoir saisi l'opportunité offerte, ainsi que le déplore Jean Villey dans un rapport pour le ministère de l'Air en 1935 [43]. Ce ne sera que trois décennies plus tard, en 1962, que sera créé un laboratoire de mécanique des fluides à Lyon, sous l'impulsion du directeur de l'École centrale [79]. Jean Mathieu, directeur du laboratoire, y initie des recherches sur la turbulence, bientôt rejoint par Geneviève Comte-Bellot qui y développe l'acoustique.

9.4.3. *Grenoble*

La géographie régionale étant peu favorable au développement de l'aéronautique, l'université de Grenoble n'avait pas été retenue par le ministère de l'Air, en 1930, pour la création d'un centre de mécanique des fluides. La discipline y est cependant enseignée à l'institut électrotechnique de la faculté des sciences, créé en 1901 dans le contexte de l'essor de l'hydroélectricité [80]. Un cours d'hydraulique y a été dispensé par Georges Routin (1871-1937), polytechnicien et ingénieur en chef des ateliers Neyret-Brenier. Deux laboratoires d'essais, extérieurs à l'institut mais avec lesquels les enseignants collaborent, ont été créés en 1922 : le Laboratoire dauphinois d'hydraulique de la société Neyret-Beylier et Piccard-Pictet (NBPP, dirigée par Maurice Gariel), et celui de la Société hydrotechnique de France (SHF) dirigé par Routin.

Un laboratoire d'hydraulique proprement universitaire est créé en 1928 sous l'impulsion de René Gosse, nouveau directeur de l'institut – devenu entretemps polytechnique –, création contemporaine de celle de l'école d'ingénieurs hydrauliciens au sein du même institut. Le laboratoire prend véritablement son essor à partir de 1935, sous la direction de Pierre Danel. Les premières études, commanditées par les Ponts et Chaussées et par la Compagnie nationale du Rhône, portent sur l'ensablement du Rhône et sur l'aménagement hydroélectrique du fleuve. La société NBPP ordonne des études de vannes, de cheminées d'équilibre, et de cavitation. Le projet

d'ouverture du tunnel routier de la Croix-Rousse, à Lyon, entraîne la création par André Fortier d'une section d'aérodynamique pour l'étude sur modèle réduit de la ventilation du tunnel. Une soufflerie supersonique est mise en service en 1946 par Lucien Santon – ancien étudiant de Foch à Paris comme Fortier – avec le soutien du ministère de l'Air et du ministère de l'Armement [41, p. 3-6]. Santon (1904-1993) dirigera de 1955 à 1971 la section hydraulique de l'institut polytechnique de Grenoble [80, p. 72-73].

Après la guerre, une petite équipe se met en place autour de Julien Kravtchenko (1911-1994), ancien étudiant de Villat, pour des études plus fondamentales sur la turbulence. En 1952, les laboratoires d'hydraulique et d'aérodynamique sont réunis dans un même laboratoire, dirigé par Kravtchenko et rattaché à la faculté des sciences et à l'École nationale supérieure d'électrotechnique et d'hydraulique (école issue de la transformation en ENSI de l'institut polytechnique). Les recherches portent sur l'hydraulique fluviale (études sur modèles réduits d'évacuateurs de crue, etc.), sur les infiltrations sous les barrages et les digues (par analogie rhéoélectrique), et sur la mesure du débit des rivières en crue par une méthode chimique de suivi d'un soluté (Robert Silber, maître de conférences). Les premières thèses grenobloises apparaissent, dont celles sur la turbulence d'Antoine Craya (1957) et, sous la direction de ce dernier, de Jean Mathieu (1959) [81]. Le laboratoire de mécanique des fluides est intégré en 1970 dans un nouvel institut de mécanique de Grenoble (IMG) [80, p. 259-263].

10. Tentative de bilan, histoire longue et recompositions

La mécanique des fluides en France pendant la première moitié du xx^e siècle se présente donc, comme s'est attaché à le montrer cet article, sous un jour plus heureux que ne le laisserait penser le peu de citations de travaux français dans les bibliographies. Un retour vers les publications, thèses et rapports de la période, montre qu'au côté de personnalités bien reconnues telles que Henri Bénard et Gustave Eiffel, des scientifiques de premier plan participent, dès avant 1930, à l'avancée de la discipline. Rappelons seulement ici l'étude des tourbillons de sillage par Charles Camichel, ou le développement de l'anémométrie à fil chaud pour l'étude de la turbulence atmosphérique par Antoine Magnan. Ces travaux s'attachent autant à améliorer une hydraulique utile aux ingénieurs (pour l'hydroélectricité, la météorologie, etc.) qu'à faire progresser les connaissances générales « désintéressées ». Un autre trait caractéristique de ces travaux est la forte culture expérimentale dont ils témoignent, dans le fil d'une tradition française vouant un véritable culte à la belle expérience et à l'instrumentation [82]. *A contrario*, les observations expérimentales suscitent peu de réflexion théorique, et restent largement découpées des travaux de « mécanique rationnelle » que poursuit, pour le coup sans grand souci des observations, un mathématicien comme Henri Villat.

C'est dans ce contexte, associé à une conjoncture aéronautique préoccupante, que se présente en 1930 le vaste programme du ministère de l'Air en faveur de la mécanique des fluides. Albert Caquot, artisan majeur de ce programme, obtient des moyens considérables distribués avec une ouverture d'esprit exceptionnelle – dont on voudrait voir s'inspirer nos dirigeants actuels! – pour quatre instituts et cinq centres annexes d'enseignement. Conscient du penchant universitaire au cloisonnement et à l'individualisme, Caquot promeut des organisations où devront collaborer étroitement les différents acteurs mathématiciens, physiciens et ingénieurs. On a rappelé ci-dessus quelques-uns des résultats obtenus, notamment autour de Pérès et Malavard sur les analogies rhéoélectriques et le calcul scientifique, autour de Bénard sur les instabilités thermoconvectives, de Kampé de Fériet sur la turbulence, ou de Camichel sur les tourbillons de sillage et les régimes instationnaires. Notons l'attachement de ces chercheurs à la bonne formation de leurs étudiants, pour l'irrigation des laboratoires et de l'industrie. Les théoriciens Jean Leray et Jean-Jacques Moreau ainsi que les physiciens Yves Rocard et Charles Sadron, auront eux aussi

bénéficié du ministère de l'Air dans le lancement de leur carrière. Les travaux et les thèses sont alors publiés, pour l'essentiel, dans les *Publications scientifiques et techniques du ministère de l'Air* – source de documentation très riche dont la numérisation serait bienvenue.

Au-delà des résultats proprement scientifiques, la vitalité de la mécanique des fluides française apparaît dans le rôle joué par la France dans la création, à Paris en 1946, de l'Association Internationale de Mécanique Théorique et Appliquée (IUTAM). Pérès en est le premier président de 1948 à 1952. Pérès, alors directeur adjoint du CNRS, participe également de près à la création de l'Office National des Études et Recherches Aéronautiques (ONERA), à la vie duquel il sera ensuite étroitement associé, avec Malavard et Germain. En 1961, Pérès, Malavard, Germain et Siestrunk fondent le *Journal de Mécanique*, qui formera plus tard le noyau du *European Journal of Mechanics*. Au niveau plus institutionnel du Comité national de la recherche scientifique, la mécanique des fluides relève alors de la section de mécanique générale et mathématiques appliquées, où elle se trouve bien représentée ; ainsi dans la mandature 1960-1963, neuf de ses vingt membres sont liés aux instituts ou centres annexes [83].

D'un point de vue plus général, la décennie qui suit la Seconde Guerre mondiale n'est pas favorable à la recherche scientifique française. La tonalité des actes du colloque de mécanique des fluides organisé à Marseille en 1952, sous l'égide du CNRS, en témoigne [41]. Mais des recompositions sont à l'œuvre qui préparent le renouveau des années soixante. Le laboratoire créé par Bénard, détruit par les Allemands, est remonté dans l'après-guerre par Foch à Saint-Cyr-l'École. En 1962, André Fortier (1907-1996), qui a succédé à Foch sur la chaire de mécanique expérimentale des fluides, réinstalle le laboratoire à Orsay sur une extension de la faculté des sciences de Paris. Il y est secondé par son étudiant Raymond Comolet bientôt professeur. Le laboratoire devient en 1983 le FAST (Fluides, Automatique et Systèmes Thermiques). Pérès et Malavard créent en 1946 un grand centre de mathématiques appliquées, l'Institut Blaise Pascal du CNRS, lequel engendre en 1971 le Laboratoire d'Informatique pour la Mécanique et les Sciences pour l'Ingénieur (LIMSI). À Marseille, Favre crée l'Institut de mécanique statistique de la turbulence, inauguré en 1961 à l'occasion d'un colloque international resté fameux, premier du genre entièrement consacré à la turbulence [60, chap. 13]. L'institut de Toulouse dirigé par Escande obtient en 1966 le nouveau label de laboratoire associé au CNRS, et voit ses thématiques de recherche renouvelées par l'arrivée d'une nouvelle génération. L'institut de Lille dirigé par Martinot-Lagarde, scientifiquement affaibli par le départ de Kampé de Fériet, survit d'études pour l'industrie, entravé par les indécisions de l'ONERA et de la faculté des sciences qui s'en renvoient la tutelle. Les centres annexes d'enseignement de Poitiers, Strasbourg et Nantes poursuivent leur développement, en association avec des formations d'ingénieur, tandis qu'à Lyon – où la marche avait été ratée en 1930 – se constitue en 1962, au sein de l'École centrale, le futur Laboratoire de Mécanique des Fluides et d'Acoustique (LMFA). Enfin, le laboratoire de mécanique des fluides de Grenoble, avec Julien Kravtchenko et Antoine Craya en particulier, s'annonce comme l'un des futurs grands centres de mécanique des fluides, notamment dans le domaine de la turbulence.

Concluons sur un effet à long terme du programme du ministère de l'Air, programme qui peut être considéré, par son envergure, comme une première politique nationale pour la recherche. Cette politique aura eu la clairvoyance d'associer étroitement, avec des moyens à la hauteur de ses ambitions, le développement de la recherche et celui de l'enseignement. Lorsque dans les années soixante le pays devra répondre à une forte demande d'ingénieurs que des écoles trop malthusiennes ne pourront satisfaire, et dans le contexte d'une croissance considérable de la population étudiante, les formations universitaires en mécanique des fluides alors en place sauront jouer leur rôle tant vis-à-vis de l'industrie que vis-à-vis des laboratoires de recherche. La mécanique des fluides française s'en trouvera placée, pour les décennies suivantes, en excellente position au niveau international.

Références

- [1] G. Eiffel, *Nouvelles Recherches sur la Résistance de l'Air et l'Aviation faites au laboratoire d'Auteuil*, vol. 1, Dunod & Pinat, Paris, 1914.
- [2] G. Eiffel, « Sur la résistance des sphères dans l'air en mouvement », *C. R. Math. Acad. Sci. Paris* **155** (1912), p. 1597-1599.
- [3] H. Bénard, « Les tourbillons cellulaires dans une nappe liquide transportant de la chaleur par convection en régime permanent », *Ann. Chim. Phys.* **23** (1901), p. 62-144, thèse de doctorat ès sciences de la faculté des sciences de Paris.
- [4] L. Rayleigh, « On convection currents in a horizontal layer of fluid, when the higher temperature is on the under side », *Phil. Mag.* **32** (1916), p. 529-546.
- [5] C. Camichel, J. Leclerc du Sablon, L. Escande, « Recherches sur la similitude (suite et fin) », *Le Génie Civil* **98** (1931), n° 17, p. 420-424.
- [6] C. Camichel, « Sur le régime permanent dans les chambres d'eau », *Revue Générale de l'Électricité* **8** (1920), n° 11, p. 331-338.
- [7] C. Camichel, « Applications des lois de similitude à l'étude des phénomènes qui se produisent à l'aval d'un corps immergé dans un fluide visqueux en mouvement », *La Technique Aéronautique* **49** (1925), p. 322-333.
- [8] C. Camichel, L. Escande, M. Ricaud, « Sur les lois de la similitude et la technique des modèles réduits », *Revue Générale de l'Électricité* **20** (1926), n° 2, p. 54-60.
- [9] C. Camichel, P. Dupin, « Sur les divers modes de contraction des filets à l'entrée d'un ajoutage », *C. R. Math. Acad. Sci. Paris* **193** (1931), n° 2, p. 102.
- [10] P. Dupin, *Étude expérimentale sur les tourbillons alternés de Bénard-Kármán*, thèse de doctorat ès sciences phys., université de Paris, France, 1930.
- [11] E. Huguenard, A. Magnan, A. Planiol, « Sur une méthode de mesure de la vitesse et de la direction instantanées du vent », *La Technique Aéronautique* **15** (1923), also published as ["A method for the instantaneous determination of the velocity and direction of the wind"] *NACA Technical Memorandum series*, **264** (1924).
- [12] H. L. Dryden, A. M. s. Kuethe, « The measurement of fluctuations of air speed by the hot-wire anemometer », in *Fifteenth Annual Report of the National Advisory Committee for Aeronautics*, U.S. Government Printing Office, 1929, p. 357-382.
- [13] A. Magnan, « Méthodes de mesure des variations rapides du vent », *Jahrbuch des Forschungs-Institutes der Rhön-Rossitten-Gesellschaft* **4** (1929), p. 92-100, also published in *NACA Technical Memorandum series*, **692** (1932).
- [14] E. Huguenard, « Les souffleries à grande vitesse. leur application à la balistique, l'aérodynamique et l'aéronautique », *La Technique Aéronautique* (1924), also published as ["High velocity wind tunnels. Their application to ballistics, aerodynamics and aeronautics"] *NACA Technical Memorandum series*, **318** (1925).
- [15] P. Wehrlié, « L'œuvre de la commission de la turbulence atmosphérique », *La science aérienne et l'aérotechnique, organe de la Société française de navigation aérienne* **8** (1940), p. 37-58.
- [16] H. Bénard, D. Avsec, « Travaux récents sur les tourbillons cellulaires et les tourbillons en bande. Applications à l'astrophysique et à la météorologie », *J. Physique* **11** (1938), p. 486-500.
- [17] D. Avsec, *Tourbillons thermoconvectifs dans l'air: Application à la météorologie*, Publications scientifiques et techniques du ministère de l'air, vol. 155, E. Blondel La Rougery, Paris, 1939.
- [18] L. Santon, *Contribution expérimentale à l'étude des souffleries supersoniques*, Publications scientifiques et techniques du ministère de l'air, vol. 68, E. Blondel La Rougery, Paris, 1935.
- [19] C. Chartier, *Chronophotogrammétrie plane et stéréoscopique. Application à l'étude cinématique d'écoulements autour d'obstacles : hélices, hangar, sphère*, Publications scientifiques et techniques du ministère de l'air, E. Blondel La Rougery, Paris, 1937.
- [20] D. P. Riabouchinsky, « Thirty years of theoretical and experimental research in fluid mechanics », *The Journal of the Royal Aeronautical Society* **39** (1935), n° 292, p. 282-348.
- [21] D. P. Riabouchinsky, *The Journal of the Royal Aeronautical Society* **39** (1935), n° 293, p. 377-441.
- [22] D. P. Riabouchinsky, « Twenty-five years more of theoretical and experimental research in fluid mechanics », *The Journal of the Royal Aeronautical Society* **66** (1962), n° 620, p. 473-488.
- [23] J. Kampé de Fériet, « Visite de la Commission Aéronautique de la Chambre des Députés le jeudi 11 mars 1937 », 1937, Arch. IMFL.
- [24] J. Kampé de Fériet, A. Martinot-Lagarde, G. Rollin, « Sur un appareil permettant de déterminer le module et la direction de la vitesse dans un fluide », *C. R. Math. Acad. Sci. Paris* **207** (1938), p. 772-774.
- [25] J. Kampé de Fériet, « The spectrum of turbulence », *J. Aeron. Sci.* **7** (1940), n° 12, p. 518-519.
- [26] F. N. Frenkiel, « Analyse statistique de la turbulence : corrélation et spectres dans un écoulement homogène », *C. R. Math. Acad. Sci. Paris* **222** (1946), p. 367, 473, 585, 1331, 1474.
- [27] F. N. Frenkiel, *Étude statistique de la turbulence : fonctions spectrales et coefficients de corrélation*, Rapport technique, vol. 34, Office National d'Études et de Recherches Aéronautiques, 1958, also published as ["Statistical theory of turbulence - Spectral functions and correlation coefficients"], *NACA Technical Memorandum series*, **1436** (1958).

- [28] L. Malavard, « Sur le problème fondamental concernant l'aile d'envergure finie », *C. R. Math. Acad. Sci. Paris* **195** (1932), p. 733-736.
- [29] J. Valensi, *Application de la méthode des filets de fumée à l'étude des champs aérodynamiques (maquettes, ailes d'avions)*, Publications scientifiques et techniques du ministère de l'air, vol. 128, E. Blondel La Rougery, Paris, 1938.
- [30] A. Toussaint, É. Carafoli, « Contribution à l'étude de l'écoulement plan des fluides », *La Technique Aéronautique* **63** (1927), p. 25-27.
- [31] A. Favre, *Contribution à l'étude expérimentale des mouvements hydrodynamiques à deux dimensions*, Publications scientifiques et techniques du ministère de l'air, vol. 137, E. Blondel La Rougery, Paris, 1938.
- [32] A. Favre, J. Gaviglio, R. Dumas, « Mesures, dans la couche limite, des intensités de turbulence et des corrélations dans le temps; spectres », in *Journées de mécanique des fluides – Marseille 1952. Colloque national no 1 du CNRS*, Publications scientifiques et techniques du ministère de l'air, vol. 296, E. Blondel La Rougery, Paris, 1955, p. 243-275.
- [33] J. Baubiac, *Étude expérimentale, en régime transitoire, du sillage et de la résistance des corps immergés*, Publications scientifiques et techniques du ministère de l'air, vol. 98, E. Blondel La Rougery, Paris, 1936.
- [34] E. Crausse, J. Baubiac, « Sur les tourbillons secondaires se produisant à l'aval d'un obstacle immergé dans un liquide », *C. R. Math. Acad. Sci. Paris* **192** (1931), n° 24, p. 1529-1531.
- [35] E. Crausse, *Contribution à l'étude expérimentale de phénomènes transitoires et de phénomènes périodiques se produisant dans les liquides en mouvement*, Publications scientifiques et techniques du ministère de l'air, E. Blondel La Rougery, Paris, 1936.
- [36] C. Camichel, L. Escande, *Similitude hydrodynamique et technique des modèles réduits*, Publications scientifiques et techniques du ministère de l'air, vol. 127, E. Blondel La Rougery, Paris, 1938.
- [37] R. Thiry, L. Sackmann, « Sur les liens qui existent entre les écoulements entre glaces parallèles et les écoulements théoriques à deux dimensions », in *Journées scientifiques et techniques de Mécanique des fluides de Lille. Tome 2*, É. Chiron, Paris, 1935, p. 167-174.
- [38] C. Sadron, « Turbulence et frottement turbulent. Théorie de Kármán », **65** (1935).
- [39] C. Sadron, « Lois du frottement lisse et du frottement rugueux en régime turbulent. Coefficient intrinsèque de frottement rugueux », *J. Phys. Radium* **6** (1935), n° 3, p. 117-122.
- [40] C. Sadron, « Lois du frottement pour les conduites rugueuses », *J. Phys. Radium* **6** (1935), n° 6, p. 263-273.
- [41] J. Pérès, *Journées de mécanique des fluides – Marseille 1952. Colloque national no 1 du CNRS*, Publications scientifiques et techniques du ministère de l'air, vol. 296, E. Blondel La Rougery, Paris, 1955.
- [42] L.-A. Sackmann, « Protection des nappes souterraines : contrôle de la nappe phréatique rhénane. Moyen de lutte contre sa pollution », *La Houille Blanche* **57** (1971), n° 8, p. 717-722.
- [43] J. Villey, *Rapport sur les Instituts et les Enseignements de Mécanique des Fluides, créés par diverses Universités sur l'Initiative du Ministère de l'Air*, 1935.

Références secondaires

- [44] H. L. Dryden, « Fifty years of boundary-layer theory and experiment », *Science* **121** (1955), p. 375-380.
- [45] S. Goldstein, « Fluid mechanics in the first half of this century », *Annu. Rev. Fluid Mech.* **1** (1969), n° 1, p. 1-29.
- [46] P. A. Davidson, Y. Kaneda, K. Moffatt, K. R. Sreenivasan, *A Voyage Through Turbulence*, Cambridge University Press, 2011.
- [47] D. Bloor, *The enigma of the aerofoil - Rival theories in aerodynamics, 1909–1930*, University of Chicago Press, 2011.
- [48] F. Charru, *Ailes, Nuages et Tourbillons. La mécanique des fluides en France de 1900 à 1950 – Une politique nationale*, Science Networks. Historical Studies, Birkhäuser; Springer, 2021.
- [49] A. Prost, *Histoire de l'enseignement en France – 1800-1967*, Armand Colin, 1968.
- [50] M. Grossetti, *Rapport final du programme Villes et institutions scientifiques*, PIR-Villes CNRS, 1996.
- [51] R. Fox, G. Weisz, *The organization of science and technology in France 1808-1914*, Cambridge University Press; Maison des Sciences de l'Homme, 1980.
- [52] A. Grelon, « Les universités et la formation des ingénieurs en France (1870-1914) », *Formation Emploi* **27-28** (1989), p. 65-88.
- [53] H. L. Dryden, *Theodore von Kármán. 1881–1963. A Biographical Memoir*, National Academy of Sciences, Washington D.C., 1965.
- [54] C. Fontanion, R. Frank, *Paul Painlevé (1863–1933) – Un savant en politique*, Presses Universitaires de Rennes, 2005.
- [55] C. Marbo, *A travers deux siècles. Souvenirs et rencontres (1883-1967)*, Grasset, Paris, 1967.
- [56] C. Fontanion, « La mécanique des fluides à la Sorbonne entre les deux guerres », *C. R. Méc. Acad. Sci. Paris* **345** (2017), n° 8, p. 545-555.
- [57] J. Kerisel, *Albert Caquot 1881-1976 – Savant, soldat et bâtisseur*, Presses de l'ENPC, 2001.
- [58] O. Darrigol, *Worlds of flow. A history of hydrodynamics from the Bernoullis to Prandtl*, Oxford University Press, 2005.
- [59] M. Eckert, *The dawn of fluid dynamics – A discipline between science and technology*, John Wiley & Sons, 2006.

- [60] M. Eckert, *Turbulence – an Odyssey. Origins and Evolution of a Research Field at the Interface of Science and Engineering*, History of Physics, Springer, 2022.
- [61] J. D. Anderson, *A History of Aerodynamics*, Cambridge University Press, 1997.
- [62] J. E. Wesfreid, « Scientific biography of Henri Bénard (1874–1939) », in *Dynamics of Spatio-Temporal Cellular Structures. Henri Bénard Centenary Review*, Springer Tracts in Modern Physics, vol. 207, Springer, 2006, p. 9–37.
- [63] J. E. Wesfreid, « Henri Bénard : Thermal convection and vortex shedding », *C. R. Méc. Acad. Sci. Paris* **345** (2017), no 7, p. 446–466.
- [64] F. Charru, *Hydrodynamic Instabilities*, Cambridge University Press, 2011.
- [65] D. Aubin, « The memory of life itself : Bénard's cells and the cinematograph of self-organization », *Studies in the History and Philosophy of Science* **39** (2008), no 3, p. 359–369.
- [66] F. Charru, « Une histoire de l'Institut de mécanique des fluides de Toulouse de 1913 à 1970 », *C. R. Méc. Acad. Sci. Paris* **345** (2017), no 8, p. 505–544.
- [67] D. Aubin, « “Audacity and Precision” : the paradoxes of Henri Villat's fluid mechanics in interwar France », *preprint*, Hal-00639877, 2010.
- [68] H. Gispert, J. Leloup, « Des patrons des mathématiques en France dans l'entre-deux-guerres », *Revue d'histoire des sciences* **62** (2009), p. 39–117.
- [69] G. Battimelli, « About the early international congresses of applied mechanics », in *IUTAM – A short history*, Springer, 2016, p. 21–30.
- [70] R. Tazzioli, « The eyes of French mathematicians on Tullio Levi-Civita - the case of hydrodynamics (1900-1930) », in *Images of Italian mathematics in France : The Latin Sisters, from Risorgimento to Fascism*, Trends in the History of Science, Springer, 2016, Hal-01436973, p. 255–288.
- [71] Y. Rocard, *Mémoires sans concessions*, Grasset, Paris, 1988.
- [72] C. d'Abzac-Epezy, « L'industrie aéronautique française pendant la Seconde Guerre mondiale : histoire et communication historique », *Nacelles* **1** (2016), <http://interfas.univ-tlse2.fr/nacelles/159>.
- [73] F. Charru, A. Demuro, « La mécanique des fluides à Toulouse durant la Seconde Guerre mondiale : entre opportunités et concurrences disciplinaires », in *Actes du colloque international Science et culture en temps de guerre, Toulouse 2020*, Éditions midi-pyrénéennes, 2022, p. 201–218.
- [74] J. Leloup, *L'entre-deux-guerres mathématique à travers les thèses soutenues en France*, Thèse, Université Pierre et Marie Curie (Paris 6), 2009.
- [75] P. Suquet, « Paul Germain (1920–2009) », *C. R. Méc. Acad. Sci. Paris* **338** (2010), no 2, p. 63–66.
- [76] E. Villermaux, P. Suquet, « The legacy of a deep thinker : Jean-Jacques Moreau », *C. R. Méc. Acad. Sci. Paris* **346** (2018), no 3, p. 153–155.
- [77] A. Bernard, *Le CEAT – Histoire d'un centre de recherches (1963–2003)*, Institut Pprime, Poitiers, 2003.
- [78] V. Fonteneau-Champeau, *De l'I.P.O. à l'E.N.S.M. (1919–1969) : les oscillations d'une école d'ingénieurs en quête de son identité entre industrie et recherche sur les matériaux dans la région nantaise*, Thèse, Université de Nantes, 2001.
- [79] M. Lance, « Le laboratoire de mécanique des fluides et d'acoustique », *Histoire de l'École Centrale de Lyon* (2009), <https://histoire.ec-lyon.fr/index.php?id=768>.
- [80] É. Robert, *L'ingénieur moteur de l'innovation – un siècle de formation d'ingénieurs à Grenoble (sous la dir. de R. Moret)*, Éditions des Vignes-l'Editeur-INPG, Grenoble, 2001.
- [81] C. Cambon, « L'héritage de Craya, pour une approche statistique à points multiples de la turbulence homogène anisotrope », *C. R. Méc. Acad. Sci. Paris* **345** (2017), no 9, p. 627–641.
- [82] D. Pestre, *Physique et physiciens en France, 1918–1940*, 2nd éd., Éditions des Archives contemporaines, Paris, 1992.
- [83] P.-E. Mounier-Kuhn, *L'informatique en France de la seconde guerre mondiale au Plan Calcul*, Presses de l'université Paris-Sorbonne, 2010.