

Comment utiliser des modèles réduits pour faire voler un aéronef ?

Similitude mécanique dans l'enseignement de l'aéronautique à la Sorbonne en 1912

Jessica Faurite

🔗 <http://interfas.univ-tlse2.fr/nacelles/1121>

Référence électronique

Jessica Faurite, « Comment utiliser des modèles réduits pour faire voler un aéronef ? », *Nacelles* [En ligne], 10 | 2021, mis en ligne le 10 mai 2021, consulté le 24 mai 2023. URL : <http://interfas.univ-tlse2.fr/nacelles/1121>

Comment utiliser des modèles réduits pour faire voler un aéronef ?

Similitude mécanique dans l'enseignement de l'aéronautique à la Sorbonne en 1912

Jessica Faurite

PLAN

1. Modèles d'échelle et lois de similitude
2. Le cours d'aéronautique de Lucien Marchis

TEXTE

- 1 Dès les débuts de l'aéronautique, des modèles de diverses échelles sont utilisés pour étudier les performances de vol des aéronefs. Le cours d'aéronautique donné par Lucien Marchis en Sorbonne en témoigne : publié, dense et riche en informations, ce cours nous permet de constater qu'entre 1909 et 1912 les lois physiques concernant l'aérodynamique, et plus généralement la mécanique des fluides, sont une préoccupation centrale de la recherche en sciences aéronautiques¹. À cette fin, les notions de modèles, lois d'échelle et similitude sont mobilisées. Le capitaine Ferdinand Ferber dénonce dès 1909 leur méconnaissance, et des scientifiques et politiques, tels que Paul Painlevé, soulignent la nécessité de développer les recherches afin de combler « le vide ou l'erreur » des savoirs de leur temps².

1. Modèles d'échelle et lois de similitude

- 2 Peu traitées en histoire et philosophie des sciences et des techniques, les notions de modèles réduits, lois d'échelle et similitude diffèrent des notions couramment présentées dans la littérature. Les lois d'échelle permettent de transposer les données obtenues sur un modèle d'échelle à un autre. Ces derniers forment des systèmes similaires de représentation en trois dimensions d'un objet. En aéronau-

tique ce sont le(s) modèle(s) réduit(s) et le prototype de l'aéronef ou d'une de ses composantes (aile...).

- 3 Afin de saisir comment le phénomène de vol est appréhendé, il est important de comprendre le rôle de la similitude en physique et en ingénierie, ses usages, sens épistémologique et portée heuristique. La similitude géométrique concerne les dimensions et la forme des objets (longueurs, volume, rugosité de surface...). La similitude mécanique – cinématique et dynamique – porte sur les vitesses d'écoulement ou les forces appliquées. En ingénierie, c'est celle-ci qui nous importe : pour observer des performances similaires, il faut que les forces le soient pour le petit et le grand modèle (point d'application, orientation et intensité proportionnelle...).
- 4 Les ingénieurs font alors appel à des lois d'échelle : les lois de Froude et de Reynolds formulées dans le domaine naval au XIX^e siècle en sont de bons exemples. Empiriques, elles précèdent les notions de « nombres de Froude » et « de Reynolds » (1919)³, qui sont des rapports sans dimension de grandeurs physiques caractérisant les propriétés de deux modèles différents⁴. L'analyse dimensionnelle s'appuie également sur la notion de similitude. Sa mobilisation la plus célèbre est le théorème Pi formulé dans un cadre aéronautique : le physicien américain Edgar Buckingham cherchait à donner un fondement et une légitimité épistémologique aux pratiques des ingénieurs⁵. Démontré en 1914⁶, ce théorème est encore utilisé aujourd'hui pour inférer des connaissances sur des systèmes changeant d'échelle.
- 5 Cependant, les usages de la similitude sont divers et présentent des limites d'application. C'est paradoxalement la force et la puissance de la similitude : elle ne peut jamais être totalement réalisée. En effet, deux systèmes entièrement similaires seraient identiques et à la même échelle. Pour contourner cette incomplétude de la similitude, qui se traduit par l'indétermination de certains rapports entre paramètres du système, l'ingénieur ou le physicien choisit quels paramètres doivent être conservés similaires. Judicieusement sélectionnés au préalable, ils permettent d'inférer des connaissances sur d'autres paramètres inconnus du système. Ainsi, on peut donc obtenir des connaissances sur l'aéronef étudié sans disposer des équations

tions complexes le caractérisant, ni connaître tous les paramètres du système.

- 6 En 1912, Émile Jouguet présente un usage de la similitude à partir de lois abstraites théoriques⁷, à laquelle le scientifique joint ce que nous nommons la « stratégie des perturbations » : chaque phénomène, tel que la gravité, la viscosité, la compressibilité de l'air... est une « perturbation » dont on peut tenir compte pour approcher au mieux la description du système étudié. La similitude était ainsi utilisée sous des formes diverses, parfois difficiles à relier au premier abord : sa mobilisation par Froude et Reynolds dans les années 1870-1880 s'approche plus de celle de Jouguet en 1912, que du théorème Pi cité dans la littérature contemporaine. Les différences sont dues à l'évolution du concept et de sa formulation.

2. Le cours d'aéronautique de Lucien Marchis

- 7 Lucien Marchis (1863-1941), physicien et éminente figure du froid industriel, s'intéresse dès 1903 à l'aéronautique⁸. Il l'enseigne pendant douze ans à l'université de Bordeaux à des ingénieurs polytechniciens, dans le but de « les mettre au courant des derniers progrès de l'Industrie et de montrer les services que la Science peut rendre à la pratique⁹ ». Nommé professeur de la chaire d'aviation de l'université de Paris en 1909¹⁰, il souhaite « concilier les intérêts de l'Université avec ceux de l'industrie pour les faire concourir aux progrès de la Science¹¹ ». Pendant la Grande Guerre, Marchis est membre de la Commission des inventions, puis chargé d'assurer les liaisons entre les services du Sous-secrétaire d'État de l'Aéronautique et la Chambre syndicale des industries aéronautiques, dans laquelle il dirige la Commission technique chargée de la normalisation et standardisation des pièces détachées. Sur rapport du ministre de la Guerre, Lucien Marchis est décoré de la Légion d'honneur en 1922¹².
- 8 L'enjeu de la chaire d'aviation est selon Marchis d'aider l'ingénieur-constructeur n'ayant pas le temps nécessaire à la réalisation d'essais :

C'est au professeur d'Université à entreprendre pour l'ingénieur des recherches capables de le tenir au courant des progrès scientifiques,

susceptibles de recevoir une application immédiate dans son industrie, et parfois de la transformer¹³.

- 9 Pour l'aider dans cette tâche, Robert Esnault-Pelterie, licencié ès physique de l'université de Paris et célèbre pionnier de l'aéronautique, est nommé assistant de la chaire d'aviation en mars 1910¹⁴. Marchis souhaite ainsi collaborer avec les constructeurs, les pilotes et les ingénieurs, évoque la création d'un laboratoire expérimental (l'Institut aérotechnique de Saint-Cyr), d'une bibliothèque spécialisée et envisage la création d'un musée de maquettes, dix ans avant la création du Musée de l'Air à Chalais-Meudon par Albert Caquot.
- 10 Dès la leçon inaugurale de 1910, Marchis fait état de lacunes en connaissance aérodynamique, il souligne la limite de l'expérimentation sur modèles réduits et la nécessité d'établir des lois de similitude pour lier données expérimentales en soufflerie et celles issues d'essais en vol. Il présente ainsi les expériences de son temps, et introduit en 1912 la méthode d'extrapolation à partir de modèles réduits développée par William Froude dans les années 1870. Cette dernière présente un mode calculatoire permettant d'inférer la puissance effective du moteur nécessaire à un navire pour être performant à une vitesse donnée (c'est-à-dire que sa traînée est minimale). Cette méthode fait appel à des rapports de grandeurs nommés « Constantes » car ce sont les mêmes pour le modèle réduit et le navire étudié. Elle repose bien sur la similitude mécanique vue plus haut, mais elle mobilise les constantes sans dimension d'une nouvelle manière. Issue de l'architecture navale, la méthode de Froude est couramment utilisée dans les Marines de l'époque¹⁵.
- 11 Pourtant Marchis manque de clarté, et le transfert entre le domaine naval et la jeune ingénierie aéronautique surprend. Néanmoins, des travaux ont montré que des transferts de connaissances et compétences avaient eu lieu entre ces deux domaines, notamment dans la navigation, le vocabulaire descriptif des aéronefs depuis les débuts de la navigation aérienne et dans les pratiques expérimentales¹⁶. L'introduction de cette méthode dans un cours d'aéronautique est donc pertinente car elle faisait partie des connaissances des ingénieurs de l'époque. Cela illustre également la mise en relation de l'enseignement universitaire des années 1910 avec le monde industriel.

- 12 En 1914 Ludwig Prandtl montre que l'usage du critère de similarité de Froude n'est pas pertinent pour l'air (on lui préfère celui de Reynolds), mais sa méthode reste utilisée pour les hydravions¹⁷. Cependant la similitude et l'usage de modèles réduits persistent dans le milieu aéronautique en étudiant d'autres paramètres physiques. En effet, jusqu'aux années 1930, les souffleries n'étant pas assez puissantes pour tester des prototypes de taille réelle, il est nécessaire de combiner études sur modèles réduits et essais en vol¹⁸. Cela reste le cas jusqu'au développement des modélisations numériques réduisant le recours systématique aux maquettes¹⁹.

NOTES

- 1 MARCHIS Lucien, *Cours d'Aéronautique*, H. Dunod & E. Pinat, Paris, 1909-1912. Le titre de la troisième partie (1912) est : *La Dynamique expérimentale des Fluides dans ses rapports avec l'Aéronautique et l'Hydronautique. Études expérimentales des hélices*.
- 2 FERBER Ferdinand, « Passer d'un modèle d'aéroplane à un autre plus grand », *L'Aérophile*, 15 mars 1909, p. 122. Sée Alexandre, *Les Lois expérimentales de l'aviation*, Gauthier-Villars, Paris, 1912, p. 4.
- 3 En 1919, Moritz Weber nomme explicitement certains rapports de grandeurs ainsi : Rouse Hunter, Ince Simon, *History of hydraulics*, Iowa Institute of Hydraulic Research, Iowa City, 1957, 269 pages, p. 236.
- 4 Ainsi lorsqu'on dit qu'un avion vole à Mach 2, son « nombre de Mach » égale 2.
- 5 STERRETT Susan G., « Physically Similar Systems : a history of the concept. » [Preprint] (2015), p. 34 et p. 42, <http://philsci-archive.pitt.edu/id/eprint/11352>, consulté le 30/04/2020.
- 6 BUCKINGHAM Edgar, « On physically similar systems : Illustrations of the use of dimensional equations », *Phys. Rev.*, n° 4, 1914/04, p. 345-376. Riabouchinsky le précède : Riabouchinsky Dimitri, « Méthodes des variables de dimension zéro, et son application à l'aéronautique », *L'Aérophile*, 1^{er} septembre 1911, pp. 407-408.
- 7 JOUGUET Émile, « La résistance de l'air et les expériences sur les modèles réduits », *La Revue de Mécanique*, Tome 32, 31 janvier 1913, pp. 9-29.

- 8 BARRIER Albert, « Une des grandes figures du froid : le Professeur Marchis », *Revue générale du Froid*, juin 1941, n° 1, pp. 33-39.
- 9 Dossier d'attribution de la Légion d'honneur de Lucien René André Edmond Marchis, 1922, « Notice sur les Travaux de M. Marchis, Professeur d'Aviation à la Faculté des Sciences de Paris », dossier 19800035/555/63340, Base de données Léonore, Archives Nationales, Site de Fontainebleau.
- 10 La chaire fondée par le mécène, négociant d'armes, Basil Zaharoff, existe jusqu'au départ en retraite de Lucien Marchis en 1934.
- 11 MARCHIS Lucien, *Cours d'Aéronautique*. Première partie : *Statique et Dynamique des Ballons : Résistance de l'air*. H. Dunod & H. Pinat, Paris, 1910, p. 12 (leçon inaugurale).
- 12 BARRIER Albert, *op. cit.*, et Dossier d'attribution de la Légion d'honneur..., *op. cit.*
- 13 MARCHIS Lucien, *Cours d'Aéronautique*, Première partie, *op. cit.*, p. 11.
- 14 MARCHIS Lucien, « L'Enseignement de l'aéronautique à l'Université de Paris », *La Revue du Mois*, 5^e année, n° 51, Tome IX, 10 mars 1910, pp. 257-269.
- 15 DISLÈRE Paul, « Expériences faites à Amsterdam sur la résistance des carènes », *Revue maritime et coloniale*, publiée par le ministère de la Marine et des Colonies, tome 57, avril 1878, pp. 519-534 ; LEGGETT Don, « Replication, re-placing and naval science in comparative context », *The British Journal for the History of Science*, n° 1, Cambridge University Press, 2013/46, pp. 1-21 ; PIAUD L., « Le bassin d'expériences de la Marine française, à Paris », *Le Génie Civil*, n° 19, 26^e année, Tome XLIX, (n° 1265 du 8 septembre 1906), pp. 289-293.
- 16 « Congrès International d'Aéronautique de 1889, Compte-rendu de la Séance du 1^{er} août, Première Section : Aviation », *L'Aéronaute*, 22^e année, n° 10, octobre 1889, pp. 221-254 ; FERREIRO Larrie D., « The mutual influence of aircraft aerodynamics and ship hydrodynamics in theory and experiment », *Archive for History of Exact Sciences*, 2014/68, pp. 241-263 ; KASPRZYK-ISTIN Marie-Cécile, *De la navigation maritime à la navigation aérienne : transferts de méthodes mathématiques et de connaissances en France dans la première moitié du XX^e siècle*, thèse de l'Université de Nantes (Spécialité : Histoire des mathématiques), 2018, Nantes, France.

17 MITCHELL R. J., « Essais au bassin de modèles d'hydravions », in Comité français de propagande aéronautique, *Premier Congrès International de la Sécurité Aérienne, Rapports Tome III*, Paris, 1932, pp. 121-127 ; PÈPE P., *Précis d'hydraviation. Cours de l'École technique d'aéronautique et de construction automobile*, F.-Louis Vivien, Paris, 1931, pp. 74-75.

18 CHANETZ Bruno, « A century of wind tunnels since Eiffel », *C. R. Mécanique*, 2017/345, pp. 581-594.

19 LANGHAAR Henry L., *Analyse dimensionnelle et théorie des maquettes*, traduction de C. Charcosset, Dunod, Paris, 1956, témoigne de cette importance.

RÉSUMÉS

Français

En 1909, le physicien Lucien Marchis devient titulaire de la Chaire d'aviation de l'université de Paris. Visant à synthétiser les connaissances de son temps pour faciliter le travail de recherche des ingénieurs de la jeune industrie aéronautique, il introduit en 1912 la méthode de Froude, issue de l'architecture navale, permettant d'obtenir des connaissances sur un prototype de taille réelle à partir de son modèle réduit. Cela fait appel à la notion de similitude qui est ancrée dans les pratiques des ingénieurs mais encore peu conceptualisée par les théoriciens de l'époque. Dans un premier temps, ce mémoire de master nous a permis d'aborder la notion de similitude de manière plus abstraite en mobilisant l'histoire et la philosophie des sciences. Dans un second temps, l'étude du contexte d'enseignement de Lucien Marchis et de son cours publié (1909-1912) témoigne d'un lien entre université et industrie, et nous donne un exemple spécifique de transfert entre naval et aéronautique.

English

In 1909, the physicist Lucien Marchis became the holder of the Chair of Aviation at the University of Paris. Aiming to summarise the knowledge of his time to facilitate the research work of the engineers of the young aeronautical industry, he introduced in 1912 the Froude method, stemmed from naval architecture, which enabled the scientist to obtain knowledge about a full-size prototype from its reduced model. This uses the notion of similarity which is embedded in the practices of engineers but little conceptualised yet by theorists of the time. First, this master's dissertation allowed us to tackle the notion of similarity in a more abstract way by drawing on the history and philosophy of science. Secondly, the study of the teaching context of Lucien Marchis and his published course (1909-1912) shows a connection

between university and industry, and gives us a specific example of transfer between naval and aeronautical fields.

INDEX

Mots-clés

similitude, Marchis (Lucien), enseignement, ingénierie aéronautique, modèles d'échelle, Sorbonne, France

Keywords

similarity, Marchis (Lucien), education, aeronautical engineering, scale models, Sorbonne, France

AUTEUR

Jessica Faurite

Doctorante à l'Université Toulouse II Jean Jaurès, École Doctorale TESC.
Laboratoires de rattachement : FRAMESPA UMR 5136, et Institut de
Mathématiques de Jussieu - Paris Rive Gauche (IMJ-PRG) UMR 7586 (Sorbonne-
Université, École doctorale de Sciences mathématiques de Paris Centre).
jessica.faurite@univ-tlse2.fr