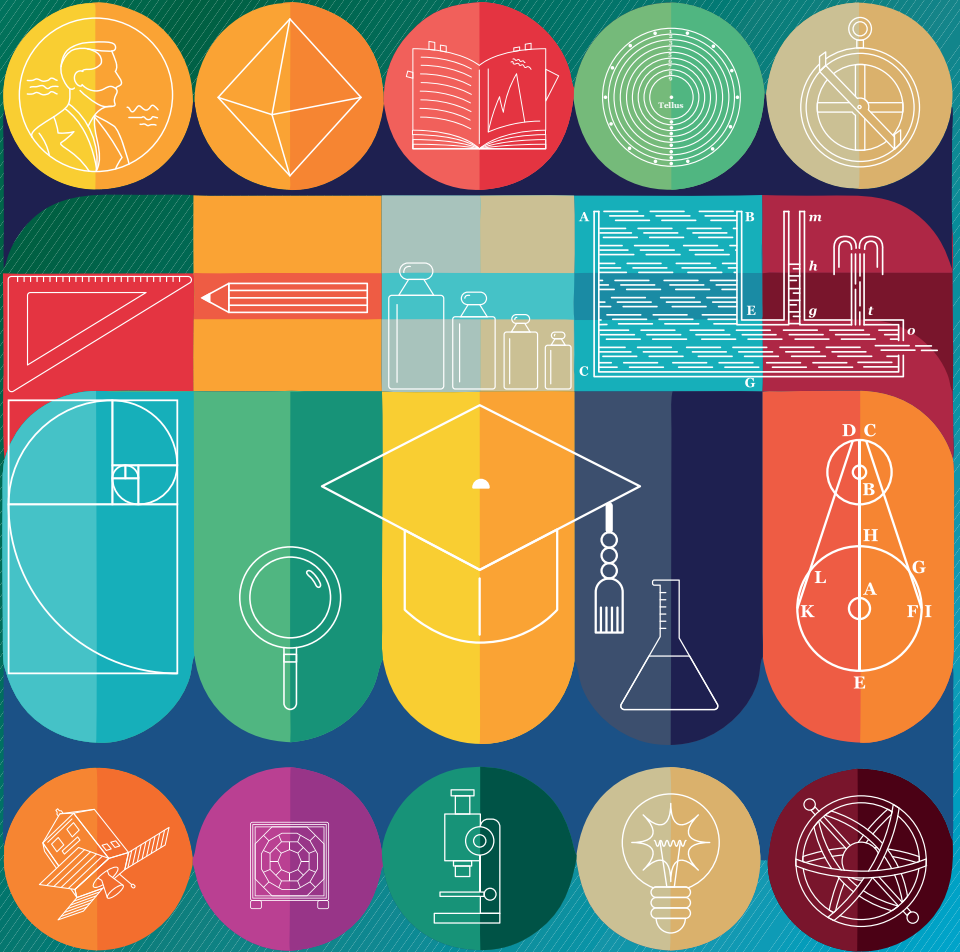




APPRENDRE ET PENSER LES SCIENCES DANS L'ENSEIGNEMENT ET LA FORMATION SCIENTIFIQUE

VERS UNE INTERDISCIPLINARITÉ
DIDACTIQUE - HISTOIRE DES SCIENCES - ÉPISTÉMOLOGIE



DIRECTION

Laurence Maurines
Christian Bracco

JOURNÉE D'ÉTUDE

3 juin 2021
MSH Paris-Saclay



13

APPRENDRE ET PENSER LES SCIENCES DANS L'ENSEIGNEMENT ET LA FORMATION SCIENTIFIQUE

*Vers une interdisciplinarité
didactique – histoire des sciences – épistémologie*

JOURNÉE D'ÉTUDE

3 juin 2021
MSH Paris-Saclay

DIRECTION

Laurence Maurines
Christian Bracco





MSH Paris-Saclay Éditions, Université Paris-Saclay, 2024.

4, avenue des Sciences, 91190 Gif-sur-Yvette

www.msh-paris-saclay.fr

Collection « Actes »

ISSN 2800-7891



Cet ouvrage est publié en accès ouvert selon les termes de la licence Creative Commons Attribution – Utilisation non commerciale – Pas d'œuvre dérivée 4.0 International (CC BY-NC-ND 4.0), qui permet le partage de l'œuvre originale (copie, distribution, communication) par tous moyens et sous tous formats, sauf à des fins commerciales, à condition que l'œuvre originale soit correctement citée et diffusée sans modification, dans son intégralité.

Pour plus d'informations : <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

ISBN 978-2-9590898-2-4

Quelques exemples d'interaction entre théorie et empirie dans l'étude statistique de la turbulence (1920-1940)

Quel intérêt pour la formation et l'enseignement de la mécanique des fluides d'aujourd'hui ?

Antonietta DEMURO

Les tensions et les rapprochements entre théorie et empirie en mécanique des fluides ont toujours animé l'histoire de ce domaine de la physique depuis le XVIII^e siècle. Dans cet article, nous nous proposons d'illustrer quatre exemples d'interaction entre ces deux mondes. La période concernée est la première moitié du XX^e siècle, plus précisément entre 1920 et 1940. Les trois premiers exemples se focalisent sur les écoulements turbulents et leur traitement statistique, d'abord en Allemagne, puis en Grande-Bretagne et aux États-Unis et, enfin, en France. Le dernier exemple montre que les tensions et les rapprochements entre théorie et empirie se reflètent également dans l'enseignement de la mécanique des fluides de l'époque. À ce propos, nous présenterons les activités d'enseignement de la mécanique des fluides à l'Institut de mécanique des fluides de Lille (IMFL). Nous nous appuyons sur ces exemples pour questionner leur possible intérêt dans l'enseignement et la formation en mécanique des fluides d'aujourd'hui.

MOTS-CLÉS : théories statistiques de la turbulence, enseignement de la mécanique des fluides, histoire de la mécanique des fluides au XX^e siècle, expérimentation, laboratoires d'aérodynamique

Introduction. La mécanique des fluides : un monde entre théorie et empirie

L'histoire de la mécanique des fluides est caractérisée par une alternance de tensions et de rapprochements entre le monde théorique

– les hydrodynamiciens – et le monde empirique – les hydrauliciens – (Darrigol, 2005). Dans ce contexte de tensions, ce sont les rapprochements entre les deux mondes, théorique et empirique, qui ont favorisé l'avancement de la mécanique des fluides. En reprenant les mots d'Olivier Darrigol, l'histoire de ce domaine de la physique est « une histoire de transgressions entre les mondes pratiques et théoriques du fluide et les différentes sous-cultures qui la favorisent » (Darrigol, 2005 : VI-VII). La prise en compte de la viscosité dans le contexte des équations d'un écoulement parfait (équations d'Euler) peut être vue comme un exemple de contact entre ces deux mondes, donnant lieu, dans la première moitié du XIX^e siècle, aux équations de Navier-Stokes.

Malgré l'existence de nouvelles équations décrivant le mouvement des fluides visqueux, d'autres tensions entre théorie et empirie existent à cette époque. Les équations de Navier-Stokes ne peuvent être résolues que dans des cas très simples d'écoulement de fluide. De plus, les fluides peuvent avoir des caractéristiques plus complexes que celles d'un fluide visqueux : ils peuvent être turbulents. En d'autres termes, ils peuvent avoir un caractère chaotique, aléatoire, et présenter des tourbillons et des échanges d'énergies sur plusieurs échelles de longueur, jusqu'à l'échelle microscopique.

Entre la fin du XIX^e et le début du XX^e siècle, les avions arrivent, le monde de l'aviation et de l'aéronautique se développe, ainsi que celui de la météorologie et de l'océanologie. Les écoulements autour des avions sont turbulents, tout comme certains mouvements atmosphériques et de l'océan. Les équations de Navier-Stokes, qui modélisent l'écoulement d'un fluide visqueux, n'assurent pas la modélisation du caractère turbulent de l'écoulement. Il devient donc nécessaire de créer d'autres théories mathématiques et de perfectionner les instruments scientifiques, en vue de vérifier ces théories dans les souffleries et dans les laboratoires. C'est dans le contexte de l'étude des écoulements turbulents que, entre 1920 et 1940, on assiste à un nouveau point de contact entre les mondes théorique et empirique¹.

¹ Sans toutefois oublier que, pendant cette période, les recherches en mécanique des fluides ne concernaient pas uniquement le problème de la turbulence. D'autres

Les premières études quantitatives et statistiques sur la turbulence apparaissent au XIX^e siècle avec les contributions de Adhémar Barré de Saint-Venant, Joseph Boussinesq, William Thomson, et Osborne Reynolds. Poussés par des problèmes liés à la construction de nouveaux canaux et à l'amélioration de la navigabilité des fleuves, les ingénieurs français Saint-Venant et Boussinesq décrivent les problèmes hydrauliques en faisant intervenir un coefficient de viscosité turbulente ε qui concentre toute l'influence de la turbulence. En se fondant sur les analogies avec la théorie cinétique des gaz, Reynolds précise les conditions pour un écoulement turbulent et décrit la transition d'un régime laminaire à un régime turbulent (Darrigol, 2005 : 219-263). Dans une note publiée en 1895, il propose une décomposition du mouvement du fluide continu u (*mean motion*) en la somme du mouvement moyen \bar{u} (*mean mean motion*) et un mouvement d'agitation turbulente w (*relative mean motion*).

La décomposition de Reynolds amène à des équations pour un écoulement turbulent similaires aux équations de Navier-Stokes, sauf pour un terme additionnel $\overline{\partial u_i / \partial t}$ lié au caractère turbulent du fluide. Entre 1920 et 1940, ces idées ont ouvert la voie d'abord aux modèles semi-empiriques, puis aux modèles statistiques de la turbulence développée².

Dans cet article, nous nous proposons d'illustrer quatre exemples d'interaction entre théorie et empirie dans la mécanique des fluides de la première moitié du XX^e siècle. Les trois premiers exemples se focalisent sur les écoulements turbulents et leur traitement statistique, d'abord en Allemagne, puis en Grande-Bretagne et aux États-Unis et, enfin, en France. Le dernier exemple montre que les tensions et les rapprochements entre théorie et empirie se reflètent également dans l'enseignement

travaux portaient, par exemple, sur la théorie de la résistance d'un fluide parfait autour d'un obstacle et sur l'étude des mouvements des fluides visqueux.

² L'histoire de la turbulence au XX^e siècle est caractérisée par deux types de problème : l'étude de l'origine de la turbulence et l'étude de la turbulence développée. Le premier problème, abordé entre 1900 et 1940, porte sur la manière dont les écoulements d'un fluide passent d'un régime laminaire à un régime turbulent pour des nombres croissants de Reynolds. Le deuxième problème, qui sera traité dans cet article, se focalise sur l'étude d'un écoulement complètement turbulent. Sur un aperçu général sur l'histoire de la théorie de la turbulence, voir par exemple : Farge, 1992.

de la mécanique des fluides de l'époque. À ce propos, nous analyserons les activités d'enseignement de la mécanique des fluides à l'Institut de mécanique des fluides de Lille (IMFL). Ces exemples nous serviront d'appui pour alimenter le questionnement, déjà existant en didactique de la physique, sur la présence d'un éventuel fossé entre théorie et empirie dans les pratiques enseignantes du supérieur d'aujourd'hui, supposé de même nature que celui observé dans l'histoire de la mécanique des fluides antérieure au xx^e siècle (Crastes, 2019 : 89). À quel moment ces développements récents vont-ils être pris en compte en France, à la fois dans la recherche mais aussi dans l'enseignement ? De quelle manière ? Quelle évolution cela traduit-il dans les méthodes d'enseignement de la mécanique des fluides ?

Introduire des constantes expérimentales dans les équations d'un écoulement turbulent entre deux parois : les méthodes semi-empiriques de Prandtl et de von Kármán

Comment interpréter le terme non linéaire $\tau = \rho \overline{u'v'}$ des équations de Navier-Stokes généralisées, afin de déterminer le profil de vitesse pour un écoulement turbulent à deux dimensions limitées par deux parois ? Cette question est à la base des théories semi-empiriques inaugurées par Ludwig Prandtl (1875-1953) et Theodore von Kármán (1881-1963) autour des années 1920. Entre 1925 et 1946, Prandtl est directeur de l'Institut de mécanique des fluides Kaiser-Wilhelm à Göttingen (devenu depuis Institut Max-Planck), un centre de recherche aérodynamique de renommée internationale accueillant des ingénieurs avec une solide formation mathématique et soucieux de l'importance de la vérification des résultats théoriques d'un point de vue expérimental. C'est à cet ingénieur allemand que l'on doit la notion de couche limite dans le problème d'un corps solide immergé dans un fluide³. En 1912, von Kármán, étudiant de Prandtl, quitte Göttingen pour accepter un poste de directeur à l'Institut d'aérodynamique de l'Université technique d'Aix-la-Chapelle. C'est la compétition entre Prandtl et von Kármán pour déduire une

³ Sur Prandtl, ses activités de mécanique des fluides dans le laboratoire de Göttingen et sa théorie de la couche limite, voir : Eckert, 2006.

loi universelle du profil de la vitesse d'un écoulement turbulent qui les amène à la création de quelques méthodes semi-empiriques pour traiter la turbulence⁴.

Entre 1924 et 1925, Prandtl s'inspire des idées de Reynolds et de Boussinesq pour étudier les équations pour un écoulement turbulent bidimensionnel de fluide non homogène sur deux plaques planes, où x est la direction moyenne de déplacement. En décomposant la vitesse (u,v) en mouvement moyen et en mouvement d'agitation turbulente du fluide :

$$u = \bar{u} + u' ; v = \bar{v} + v'$$

les équations du mouvement du fluide turbulent pour la composante x de la vitesse u prendront la forme suivante :

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} = \frac{1}{\varrho} \frac{\partial}{\partial x} (P + \overline{\varrho u^2} - \mu \frac{\partial \bar{u}}{\partial x}) + \frac{1}{\varrho} \frac{\partial}{\partial y} (\mu \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} - \overline{\varrho u' v'})$$

où ϱ est la densité, P la pression, μ le coefficient de viscosité cinématique du fluide et $\tau = \overline{\varrho u' v'}$ le terme non linéaire dû à la présence d'une composante d'agitation turbulente (Battimelli, 1986 : 9). Sous ces conditions, les fluctuations transversales de la vitesse v , qui suivent la direction y , se superposent au mouvement moyen u , qui suit statistiquement la direction x . En 1877, Boussinesq avait représenté le terme additionnel $\tau = \overline{\varrho u' v'}$ sous la forme $\varrho \varepsilon \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \right)$, où ε , la viscosité turbulente, est une quantité inconnue qui dépend de la particularité du fluide turbulent. L'idée de Prandtl est de remplacer le coefficient ε de Boussinesq par une expression testée expérimentalement :

$$\varepsilon = l^2 \left| \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \right|$$

où l est une longueur caractéristique appelée « parcours de mélange » qui établit l'échelle des fluctuations des vitesses. Prandtl détermine cette longueur en faisant des analogies avec la théorie cinétique des gaz et en traitant les particules du fluide turbulent comme des molécules en collision. D'après

⁴ Sur la compétition entre Prandtl et von Kármán pour déduire une loi universelle du profil de la vitesse d'un écoulement turbulent, voir : Bodenshatz & Eckert, 2011. Sur une analyse mathématique détaillée de la contribution de Prandtl et de von Kármán aux théories semi-empiriques de la turbulence, voir également : Battimelli, 1986.

ce rapprochement, le parcours de mélange l est une longueur caractéristique des fluctuations transversales de la vitesse turbulente qui joue, dans l'étude de la turbulence, le même rôle que le parcours libre moyen dans la théorie cinétique du gaz. Les distributions théoriques de la vitesse du fluide obtenues par cette approche sont en excellent accord avec les mesures expérimentales obtenues par l'ingénieur Walter Tollmien au sein du laboratoire d'aérodynamique de Göttingen dirigé par Prandtl (1927 : 18-21).

Quelques années plus tard, von Kármán assume les hypothèses de similarité pour les fluctuations de la vitesse et détermine le parcours de mélange l comme une quantité proportionnelle aux dérivées premières et secondes de la vitesse moyenne \bar{u} autour de $y=0$. Cela lui permet de dépasser les difficultés de trouver l expérimentalement et d'explicitier le profil de vitesse U de l'écoulement d'un fluide turbulent entre deux parois parallèles de hauteur h avec une contrainte de cisaillement τ_0 au niveau des parois :

$$U = U_{max} + \frac{1}{k} \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}} \left(\log \left(1 - \sqrt{\frac{y}{h}} \right) + \sqrt{\frac{y}{h}} \right)$$

où la constante k est la seule constante à déterminer expérimentalement. Ces résultats seront confirmés par les ingénieurs de son laboratoire et par l'ingénieur Johann Nikuradse du laboratoire d'aérodynamique de Göttingen (Kármán, 1931 : 20-21).

Les travaux de Prandtl et de von Kármán représentent une tentative d'élaborer des théories en accord avec l'empirie. Cependant, les solutions théoriques obtenues dépendent encore de constantes empiriques, à savoir le parcours de mélange l et la constante k de von Kármán. Cela pose des limites pour des cas plus complexes, puisque ces constantes doivent être déterminées expérimentalement pour chaque configuration du fluide. Comment procéder, par exemple, dans le cas d'un écoulement sans parois et homogène ?

Créer des théories mathématiques en accord avec les expérimentations : la théorie statistique de la turbulence de Taylor

La théorie statistique de la turbulence est inaugurée par Geoffrey Ingram Taylor (1886-1975) pendant les années 1920. Ce physicien anglais, passionné par la météorologie et par l'océanologie, effectue diverses

observations liées à ces deux domaines, en s'intéressant aux phénomènes turbulents de l'atmosphère et aux propriétés de diffusion des particules produite par les fluctuations de la vitesse turbulente. Suite à la tragédie du Titanic en 1912, il prend part à l'expédition scientifique organisée par le gouvernement britannique pour étudier le problème des icebergs dans l'Atlantique Nord. À bord du bateau Scotia en tant que météorologiste, il recueille des données pour mesurer la distribution verticale de la température, la distribution de la vitesse du vent et le processus de diffusion turbulente de la chaleur et de l'humidité⁵. Durant la Première Guerre mondiale, il est mobilisé à la Royal Aircraft Factory pour conduire des travaux d'aéronautique. En 1923, il est nommé *Yarrow Research Professor* de la Royal Society, ce qui lui permet de consacrer ses activités totalement à la recherche en mécanique des fluides et en mécanique des solides, sans dispenser d'enseignement.

Les premières traces de sa théorie statistique de la turbulence se trouvent dans un article publié en 1922 dans la revue *Proceedings of the London Mathematical Society*, où il donne une interprétation mathématique aux processus de diffusion turbulente (Taylor, 1922). Afin d'étudier le mouvement horizontal d'une particule de fluide turbulent $u(t)$ qui se déplace horizontalement et aléatoirement à gauche et à droite à chaque instant t , Taylor emprunte à la statistique la fonction de corrélation pour décrire la corrélation, d'un point de vue lagrangien, entre les fluctuations irrégulières de la vitesse en deux instants successifs t et $t + \xi$:

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

Cette relation lui permet de déduire, dans le problème de diffusion turbulente, la loi de distribution moyenne des particules de fluide, initialement concentrées en un point et qui traversent une distance X durant un intervalle de temps T .

Ce travail, publié dans une revue académique adressée à des mathématiciens, attirera l'attention des praticiens dix ans plus tard. C'est seulement à partir des années 1930 que les laboratoires d'aérodynamiques

⁵ Sur Taylor, voir : Sreenivasan, 2011. Sur une analyse mathématique détaillée de sa contribution à la théorie statistique de la turbulence, voir également : Battimelli, 1986.

allemands, anglais, français et américains commencent à s'intéresser au travail de Taylor, dans un contexte où la nature des problèmes change et au cours duquel les expérimentateurs perfectionnent leurs techniques d'utilisation des anémomètres à fil chaud, afin d'effectuer des mesures plus précises des fluctuations irrégulières de la vitesse turbulente en deux instants successifs.

Les deux notes de Taylor parues en 1935 et 1938 développent les idées contenues dans l'article publié en 1922 et rencontrent un grand succès auprès des expérimentateurs (Taylor, 1935 et 1938). Dans la note de 1935, Taylor étudie le concept d'échelle de la turbulence pour pouvoir traiter le phénomène turbulent comme un transfert continu d'énergie cinétique du tourbillon de taille la plus grande (à l'échelle la plus grande) au tourbillon de taille la plus petite (échelle la plus petite), où les effets de viscosité gagnent sur ceux de l'énergie cinétique et causent la dissipation du tourbillon. Dans la même note, il simplifie les équations du problème de la dissipation de l'énergie des tourbillons en formulant l'hypothèse de turbulence isotrope, selon laquelle les fluctuations de la vitesse sont statistiquement les mêmes dans toutes les directions. Contrairement à sa note de 1922, les résultats de Taylor sur la dissipation d'énergie et sur l'hypothèse de turbulence isotrope trouvent un moyen de connecter la fonction de corrélation à des propriétés qui peuvent être mesurées en laboratoire ; et ce grâce aussi au perfectionnement des anémomètres à fil chaud réalisé par l'équipe de Hugh L. Dryden au National Bureau of Standards et par l'équipe de L. F. G. Simmons au National Physical Laboratory.

Dans la note publiée en 1938, Taylor introduit la notion de spectre de la turbulence $F(\omega)$ pour étudier la répartition de l'énergie sur toutes les échelles de fréquence ω . Si les variations de la vitesse u d'un écoulement sont dues à des tourbillons produits par un courant d'air de vitesse U , le spectre peut être mis en relation avec la fonction de corrélation R_x des fluctuations de u en deux points différents à distance x :

$$F(\omega) = \frac{4}{U} \int_0^{\infty} R_x \cos \frac{2\pi\omega x}{U} dx$$

Cette relation sera confirmée par les expérimentations menées au National Bureau of Standards et au National Physical Laboratory (voir

Figure 1). La théorie de Taylor sera généralisée au cas tridimensionnel par von Kármán qui, pendant les années 1930, avait quitté l'Allemagne pour accepter un poste de directeur au Guggenheim Aeronautical Laboratory du California Institute of Technology (GALCIT), à Pasadena.

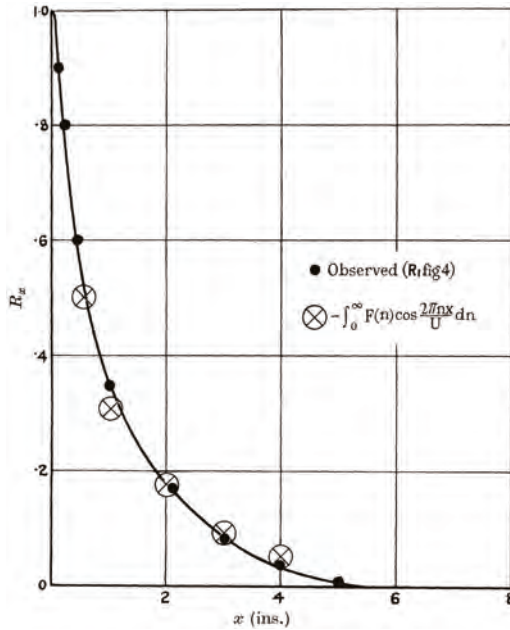


Figure 1 – Les mesures de R_x réalisées au National Physical Laboratory et les valeurs de R_x calculées à partir de $F(\omega)$

Source : Taylor, 1938 : 481.

La théorie statistique de la turbulence de Taylor-von Kármán témoigne d'une volonté d'élaborer des théories mathématiques de la mécanique des fluides les plus proches possible de l'expérimentation et des problèmes concrets de l'aéronautique, de la météorologie et de l'aviation impliquant la prise en compte d'un écoulement turbulent. On peut évoquer comme exemple l'évolution des résultats théoriques de Taylor entre sa note de 1922 et sa note de 1935 à propos de la fonction de corrélation et ses propriétés mesurables dans le problème de la dissipation de l'énergie si

l'hypothèse d'isotropie est assumée. Le perfectionnement des instruments permet de mesurer les fluctuations de la vitesse en deux instants successifs de la fonction de corrélation à l'aide d'anémomètres toujours plus précis. De plus, les souffleries peuvent produire artificiellement une turbulence isotrope nécessaire pour simplifier le nombre d'inconnues intervenant dans le problème de dissipation des tourbillons. La nature du problème de la turbulence change : l'étude des fluides non homogènes entre deux parois est maintenant remplacée par l'étude de fluides homogènes, isotropes et loin de parois.

La théorie statistique de Taylor-von Kármán sera acceptée, développée et généralisée par les ingénieurs, les physiciens et les mathématiciens d'Allemagne, de Grande Bretagne, des Pays-Bas et des États-Unis. Et en France, qu'en est-il ?

Traiter la vitesse d'un écoulement comme une variable aléatoire pour avoir des données plus conformes à l'expérience : la théorie de Wehrlé et Dedebant

En France, en 1935, l'étude théorique et expérimentale de la turbulence est confiée à la Commission de la turbulence atmosphérique, une commission fondée par le ministère de l'Air et présidée par Philippe Wehrlé (1890-1965), directeur de l'Office national météorologique (ONM)⁶. Elle comprenait des collaborateurs de l'ONM, des ingénieurs de l'aéronautique ainsi que divers professeurs de mécanique des fluides comme Albert Métral, Henri Bénard et Joseph Kampé de Fériet (1893-1982). Au sein de cette commission, les études statistiques de la turbulence suscitent la création d'un groupe de recherche autour de Wehrlé et de Georges Dedebant (1902-1965), directeur du service de recherche de l'ONM et membre aussi de la Commission.

En partant de leur expérience dans le domaine de la météorologie et ses applications dans l'aviation, Wehrlé et Dedebant élaborent une théorie visant à réinterpréter en langage aléatoire les idées de Taylor et

⁶ Fondé en 1921 afin d'unifier une grande partie des services météorologiques français, l'ONM a été rattaché au ministère de l'Air en 1930. Sur une histoire de l'ONM, voir : Roy, 2012.

de von Kármán sur le problème de la turbulence développée. En supposant le point de vue de Leonhard Euler où les mesures de la vitesse sont faites sur un réseau de points P fixes dans l'espace, Wehrlé et Dedebant décomposent le mouvement turbulent d'un fluide stationnaire :

$$v(P) = \overline{v(P)} + v'(P)$$

où $\overline{v(P)}$ est la valeur moyenne de la vitesse en P obtenue en prolongeant la mesure sur un intervalle de temps assez long pour que $\overline{v(P)}$ garde la même valeur (fluide stationnaire). Cette valeur moyenne varie d'ailleurs d'un point P à un autre de manière que le mouvement moyen soit défini par un champ de vitesse indépendant de t , mais dépendant de (x,y,z) . $v'(P)$ désigne la composante turbulente de la vitesse qui a défilé dans un petit volume entourant P pendant un intervalle de temps considéré. Si la valeur moyenne de la vitesse $\overline{v(P)}$ est une fonction continue et dérivable de (x,y,z) , Wehrlé et Dedebant refusent de traiter la composante d'agitation $v'(P)$ comme une fonction continue et dérivable, contrairement à leurs prédécesseurs Taylor et von Kármán. Les deux ingénieurs français suppriment cette hypothèse de régularité pour étudier $v'(P)$ comme une variable aléatoire, plus précisément comme un champ de variables aléatoires qui varient d'un point P à l'autre et dans le temps t . D'après eux, l'étude de la vitesse turbulente à partir de courbes de fréquence de la vitesse obtenues expérimentalement devrait permettre de conserver la nature aléatoire de la turbulence et d'obtenir ainsi des données plus conformes à l'expérience.

À partir de ces idées, Wehrlé et Dedebant construisent une théorie sans envisager $v'(P)$ comme une courbe régulière qui décrit le mouvement des fluides turbulents et en s'appuyant sur une « analyse aléatoire ». Plus précisément, ils étendent les règles de l'analyse classique pour introduire les notions de « dérivée aléatoire » et d'« intégrale aléatoire », nécessaires pour pouvoir réécrire les équations du mouvement du fluide sans passer par l'utilisation de dérivées classiques⁷. Les résultats théoriques sont en accord avec les résultats expérimentaux réalisés à l'IMFL. Ces expérimentations

⁷ Pour plus de détails sur l'école de Wehrlé et Dedebant et leur théorie développée au sein de la Commission de la turbulence atmosphérique, voir : Demuro, 2020.

sont possibles grâce à la collaboration scientifique entre l'ONM et l'IMFL établie dans le cadre de la Commission de la turbulence atmosphérique. Le directeur de l'IMFL, Kampé de Fériet, mathématicien et spécialiste au niveau international dans l'étude de la turbulence depuis les années 1930, avait participé activement à l'évolution expérimentale de cette théorie en prenant part aux prises de mesures aérologiques de Wehrlé et Dedebant sur le terrain et en mettant à disposition les souffleries de l'IMFL pour vérifier certains de leurs résultats théoriques⁸. Les éléments principaux de la théorie de Wehrlé et Dedebant seront présentés par Kampé de Fériet lors du Congrès international de mécanique appliquée (*International Congress of Applied Mechanics* [ICAM]) de Cambridge en 1938, sur la proposition de von Kármán et devant les spécialistes de la turbulence les plus renommés de l'époque à savoir Taylor, Prandtl et le même von Kármán.

Après les années 1940-1945, les idées de Wehrlé et Dédebant deviennent de plus en plus abstraites et plus proches de questions philosophiques que scientifiques. Ils s'appuieront sur leur théorie de l'analyse aléatoire pour construire « une mécanique aléatoire » visant à généraliser la mécanique classique, et dont la théorie statistique de la turbulence n'est qu'un cas particulier. Ces idées déboucheront sur le concept d'« univers aléatoire » et sur la réinterprétation de toutes les branches de la physique au moyen de l'analyse aléatoire. Leurs recherches deviendront de plus en plus marginales jusqu'à être oubliées à la fin de la Seconde Guerre mondiale par leurs contemporains et successeurs.

⁸ Contrairement au plan expérimental, le rôle de Kampé de Fériet vis-à-vis de la théorie de Wehrlé et de Dedebant reste assez marginal en ce qui concerne le développement mathématique de leurs résultats. À partir de la fin des années 1930, Kampé de Fériet donnera une contribution mathématique à la théorie statistique de la turbulence en s'appuyant sur une approche probabiliste qui s'éloignera de celle de Wehrlé et de Dedebant. Sa théorie sera acceptée et reconnue au niveau international, surtout après la Seconde Guerre mondiale, en particulier dans le milieu américain autour de von Kármán. Sur la trajectoire scientifique de Kampé de Fériet et sur les activités de l'IMFL pendant l'entre-deux-guerres, voir : Demuro, 2018 et 2020.

Entre théorie et pratique dans l'enseignement de la mécanique des fluides en France entre 1920 et 1940 : le cas de l'Institut de Lille

Les interactions entre théorie et pratique concernent non seulement la recherche en mécanique des fluides, mais aussi l'enseignement de cette discipline. Avant la Première Guerre mondiale, sauf quelques exceptions⁹, il existe très peu de laboratoires expérimentaux où la recherche et l'enseignement de la mécanique des fluides tissent des liens avec les aspects les plus pratiques de la discipline. Les enseignants des universités restent dans la tradition des ingénieurs-savants qui donne de l'importance au rôle des mathématiques dans les théories de la mécanique des fluides. À titre d'exemple, la chaire d'aéronautique de la faculté des sciences de Paris propose des cours principalement théoriques qui comprennent exceptionnellement des enseignements plus pratiques. Il en va de même pour les ingénieurs des grandes écoles et de l'École polytechnique. Face à la crise de l'aéronautique française qui se manifeste après la Première Guerre mondiale, la position du ministère de l'Air est assez claire : combler les lacunes en mécanique des fluides signifie rattraper le retard scientifique et technologique que l'aéronautique avait accumulé par rapport aux pays voisins. Ces lacunes sont aussi liées, d'après le ministre de l'Air Laurent Eynac, à la place marginale laissée aux expérimentations dans les universités françaises :

En ce qui concerne les problèmes relatifs à la sustentation même des avions, la question se présentait plus complexe [par rapport aux autres secteurs scientifiques susceptibles de contribuer aux recherches de l'aviation (métallurgie, mécanique, physique et chimie)], puisqu'il fallait créer le cadre même des recherches qu'ils nécessitent ; la mécanique des fluides tout au moins sous son aspect expérimental n'occupait en effet dans les Universités françaises qu'une place extrêmement réduite vis-à-vis de ce qui serait nécessaire pour fournir les bases des perfectionnements à rechercher¹⁰.

⁹ À titre d'exemple : les laboratoires d'aérodynamique Eiffel et l'Institut aérotechnique de Saint-Cyr, les laboratoires d'hydraulique de Nancy, de Grenoble et de Toulouse et l'Institut industriel du Nord (IDN).

¹⁰ Circulaire du ministre de l'Air, 22 mai 1929, Archives de l'Office national d'études et de recherches aérospatiales (ONERA) de Lille.

C'est dans le contexte du développement de l'aviation et du besoin de promouvoir la recherche aéronautique nationale qu'on voit apparaître, entre 1923 et 1929, les premiers instituts de mécanique des fluides (Lille, Marseille, Paris et Toulouse) et les premiers centres d'enseignement (Strasbourg, Poitiers, Nantes, Caen, Lyon). Dans ce processus d'étatisation de la mécanique des fluides et de l'aéronautique, le ministère de l'Air prévoyait un renforcement de la recherche, mais aussi de l'enseignement de la mécanique des fluides expérimentale, dans la logique d'un équilibre entre cours théoriques, cours expérimentaux et travaux pratiques liés à l'aviation. Grâce à une convention entre le ministère de l'Air et les facultés des sciences concernées par la création de ces établissements, un certificat de mécanique des fluides, commun aux instituts et aux centres d'enseignement, est alors mis en place. Une deuxième initiative du ministère de l'Air porte sur l'organisation d'un concours national entre les étudiants des différentes universités, dans le but de conserver les liens entre les instituts (Charru, 2021 : 93).

Dans la plupart de ces centres, l'enseignement de la mécanique des fluides théorique est confié à un mathématicien professeur, alors que l'enseignement de la mécanique des fluides expérimentale est assuré par un physicien chef des travaux ou maître de conférences. À Lille, Paris et Marseille, ces mathématiciens sont aussi directeurs de leurs instituts. À l'IMFL – déjà rencontré dans la section précédente pour ses collaborations scientifiques avec l'ONM visant à légitimer d'un point de vue expérimental la théorie de Wehrlé et Dedebant –, comme dans les autres instituts de mécanique des fluides affiliés au ministère de l'Air, les cours sont assurés par des professeurs ayant des approches variées, selon leur spécialité en mécanique des fluides, théorique, expérimentale ou pratique. L'enseignement de la mécanique des fluides théorique est confié à Kampé de Fériet, en tant que titulaire de la chaire de mécanique des fluides et directeur de l'institut, alors que André Martinot-Lagarde, en tant que maître de conférences de mécanique des fluides, assure la direction des travaux pratiques des élèves, ainsi que l'enseignement du cours de mécanique des fluides expérimentale et aérodynamique appliquée à l'aviation.

Durant l'entre-deux-guerres, le programme d'enseignement de l'IMFL et des autres instituts de mécanique des fluides prévoyait un enseignement de base et un enseignement complémentaire. Les contenus de

l'enseignement de base sont établis au niveau national sous la supervision du directeur général technique du ministère de l'Air, Albert Caquot. La proportion des cours théoriques et des cours plus pratiques était équilibrée dans l'enseignement de base de l'IMFL. Les 25 leçons annuelles de mécanique des fluides théoriques étaient accompagnées par 25 leçons annuelles de mécanique des fluides expérimentale et par 25 leçons d'aérodynamique appliquée à l'aviation. Cet enseignement était destiné aux étudiants de la faculté des sciences de Lille préparant le certificat de mécanique des fluides, ainsi qu'aux étudiants de deuxième et troisième année de la section d'aéronautique de l'IDN. D'autres étudiants pouvaient participer à ces cours, notamment les étudiants préparant le diplôme d'université de mécanique des fluides, un certificat délivré aux étudiants qui ne possédaient pas le titre universitaire requis pour la licence ès sciences, mais qui en même temps aspiraient à accéder au personnel technique de l'aéronautique. L'institut accueillait également des étudiants de troisième année de l'École nationale supérieure des arts et métiers pour effectuer des manipulations dans les laboratoires. Contrairement à l'enseignement de base, l'enseignement complémentaire bénéficiait d'une plus ample liberté de choix dans les sujets à traiter et pouvait varier d'un institut de mécanique des fluides à l'autre. À l'IMFL, cet enseignement incluait des cours d'aérodynamique et d'hydrodynamique supérieure. En particulier à partir de l'année 1933-1934, l'enseignement complémentaire est centré sur des sujets concernant l'étude de la turbulence, domaine de prédilection de l'institut pendant l'entre-deux-guerres. L'enseignement complémentaire est adressé aux étudiants de la faculté des sciences candidats à l'agrégation et aux futurs chercheurs préparant le certificat d'aérodynamique et hydrodynamique supérieures (équivalent au diplôme d'études supérieures). Les extraits du programme d'enseignement de l'IMFL (voir Figures 2, 3 et 4) montrent les efforts institutionnels de l'IMFL dans le renforcement des enseignements expérimentaux de la mécanique des fluides par rapport aux théoriques.

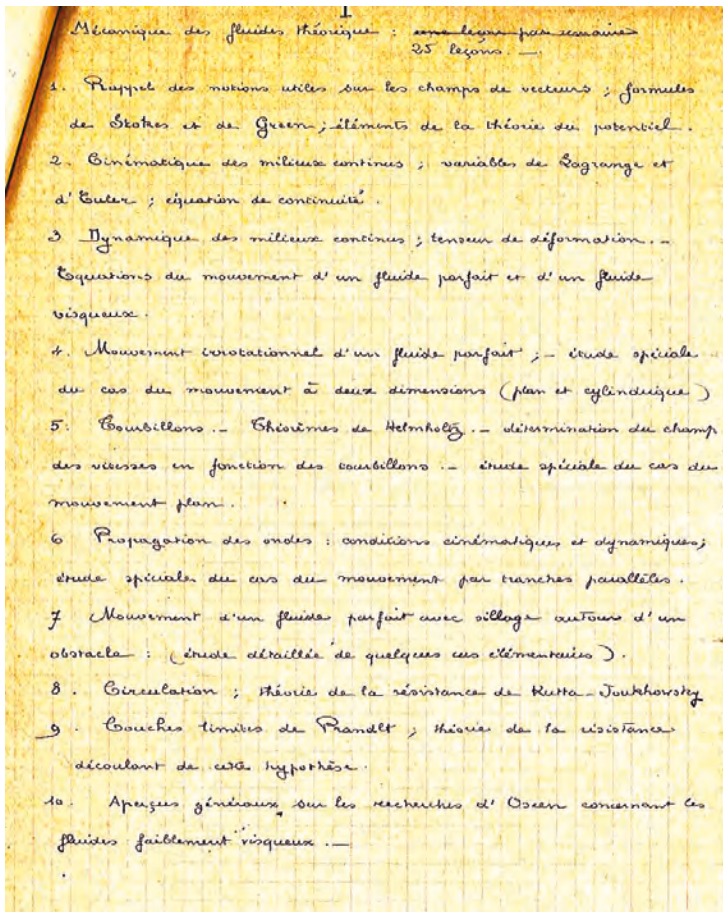


Figure 2 – Programme du cours de mécanique des fluides théorique de l'IMFL

Source : Archives de l'ONERA de Lille.

II Mécanique des fluides expérimentale 45 leçons

Thermodynamique : Éléments de théorie cinétique des gaz ; équations d'état ; conductibilité de la chaleur

Hydrostatique : manomètres, nivellement barométrique ; force ascensionnelle ; équilibre des corps flottants. — Capillarité

Fluides considérés comme incompressibles et non visqueux

Théorie de Bernoulli ; même des vitesses par mêmes de pression.

Jets. — Roues hydrauliques.

Fluides incompressibles visqueux

Écoulement par tuyaux capillaires (lubrification ; frottement à l'épave)

Nombre de Reynolds, écoulement turbulent ; Tubes de Venturi, injecteurs.

Tourbillons, formation et propagation ; tourbillons alternés.

Résistance : méthodes de mesure de résistance, de pression, de vitesse ; résultats pour les corps ~~de révolution~~ de très grande longueur ; effets de bords.

Effet Magnus. — Portance du plan incliné, de l'aile d'avion, de l'aube à fente ; plaque ; métacentre. Tourbillons marginaux. Interaction de deux plans.

Essais de modèles d'avions.

Mouvements, ventilatateurs, hélice propulsive.

Aspiration

Résistance des coques ; hydroglisseurs.

Fluides compressibles

Tuyaux à grande vitesse ; compresseurs et moteurs à air comprimé.

Hélices rapides ; — Obus.

Similitude

Fluides baroclines ; mouvements de l'atmosphère terrestre.

Figure 3 – Programme du cours de mécanique des fluides expérimentale de l'IMFL

Source : Archives de l'ONERA de Lille.

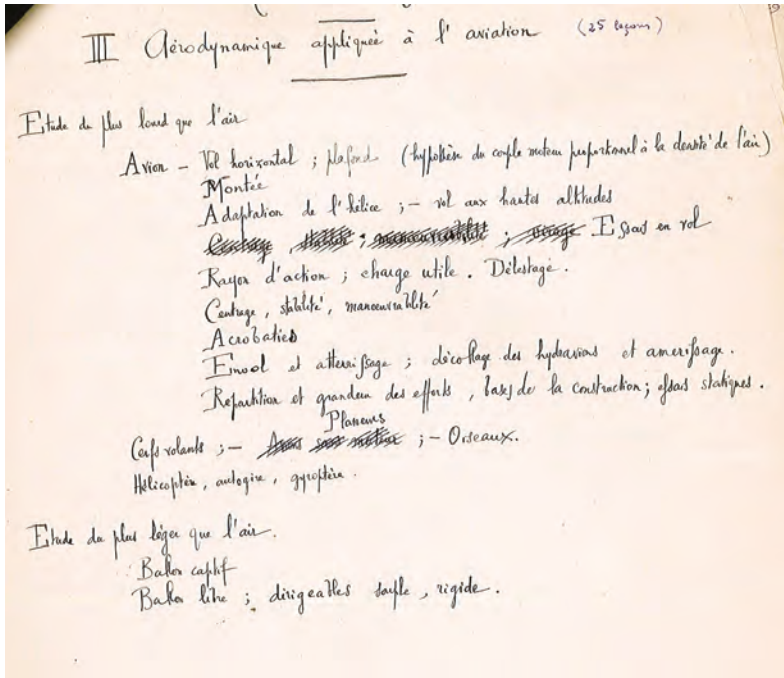


Figure 4 – Programme du cours d'aérodynamique appliquée à l'aviation de l'IMFL
 Source : Archives de l'ONERA de Lille.

Conclusion. Quel intérêt pour la formation et l'enseignement de la mécanique des fluides d'aujourd'hui ?

Dans la plupart des cours de mécanique des fluides des universités d'aujourd'hui, l'étude des écoulements progresse de celle des écoulements parfaits à celle plus complexe des écoulements visqueux, et s'étend parfois jusqu'à la théorie de la couche limite de Prandtl. Cette progression aborde des contenus théoriques construits et développés dans l'histoire de la mécanique des fluides entre le XVII^e et le XIX^e siècle, et parfois jusqu'au début du XX^e siècle. C'est de cette période dont relèvent les principaux éléments présentés dans un cours introductif de mécanique des fluides au niveau du

premier cycle de l'enseignement supérieur. En inscrivant ses recherches sur les pratiques enseignantes de la modélisation en France et aux États-Unis dans le champ de la *Nature of Science* (NoS), le didacticien de la physique Clément Crastes se demande, entre autres, si les reliquats du fossé entre théorie et expérimentation caractérisant l'histoire de la mécanique des fluides entre le XVII^e et le XIX^e siècles sont encore présents aujourd'hui dans l'enseignement supérieur de la mécanique des fluides :

Il s'agit par exemple de la difficulté d'associer prévisions théoriques et données expérimentales. Le fait qu'historiquement, le développement théorique des hydrodynamiciens du XVIII^e siècle se soit construit de manière plus ou moins déconnectée des données obtenues par les hydrauliciens interroge également le recours à l'expérimental que les enseignants déclarent employer en mécanique des fluides. L'approche retenue pour enseigner cette discipline est-elle déconnectée d'un recours à l'expérimental ? De plus, les enseignants suivent-ils la démarche historique des hydrodynamiciens, à savoir débiter l'étude des écoulements en négligeant la viscosité pour ensuite en tenir cas, face aux contradictions entre prévisions théoriques et résultats expérimentaux observés ? Par ailleurs, les problématiques originelles (approvisionnement en eau, etc.) ayant mené à la construction de ce savoir qu'est la mécanique des fluides sont-elles évoquées par les enseignants interrogés ? Les interactions entre la communauté des chercheurs en mécanique des fluides et la société sont-elles reprises ? (Crastes, 2019 : 89)

Dans notre article, nous avons présenté quelques exemples d'interaction entre théorie et empirie dans l'étude d'un écoulement turbulent durant la première moitié du XX^e siècle. Quelle place donner à l'histoire de la théorie de la turbulence par rapport aux analyses didactiques déjà effectuées pour les écoulements parfaits et visqueux ? Les exemples historiques évoqués pourraient-ils apporter de nouveaux éléments au questionnement actuel à propos de l'existence d'un fossé entre théorie et empirie dans les pratiques enseignantes d'aujourd'hui ? L'enseignement reproduit-il la démarche historique jusqu'au cas des écoulements turbulents ? Dans l'enseignement de la mécanique des fluides d'aujourd'hui, quelle place est faite à l'histoire de la découverte de la turbulence ? Ce chapitre de l'histoire de la mécanique des fluides pourrait-il être exploité dans la formation des enseignants du supérieur afin de leur permettre de réfléchir sur leurs pratiques ? Nous

n'avons pas la prétention de donner une réponse à ces questions relevant de la didactique de la physique.

Nous souhaitons néanmoins nous appuyer sur les exemples historiques évoqués dans notre article pour souligner l'importance de certains aspects à prendre en compte dans l'éventualité d'un intérêt didactique à l'égard de l'histoire de la théorie de la turbulence de la première moitié du *xx*^e siècle. Tout d'abord, comparée aux théories d'hydrodynamiques des siècles passés, l'histoire des théories de la turbulence est celle d'un phénomène complexe présentant encore aujourd'hui des questions ouvertes en termes de modélisation. Les équations de Navier-Stokes peuvent être résolues principalement dans le cas de configurations extrêmement simplifiées. À ce jour, il n'y a pas encore une théorie complète de la turbulence développée. D'autres difficultés sont dues à l'existence de plusieurs échelles et à la présence d'outils mathématiques non élémentaires empruntés aux théories modernes de calcul des probabilités et des statistiques. Dans cet article, nous avons par exemple évoqué la fonction de corrélation décrivant les fluctuations irrégulières de la vitesse en deux instants successifs, l'intégrale du spectre de la turbulence, ainsi que la vitesse d'un écoulement turbulent comme variable aléatoire. Au-delà de ces difficultés, il nous semble nécessaire de mettre l'accent sur les aspects culturels et épistémologiques qui entrent en jeu dans cette histoire, et sur des tensions et rapprochements qui se manifestent durant la première moitié du *xx*^e siècle : l'existence de communautés différentes sur plusieurs échelles – locale, nationale et internationale –, l'écriture de théories reconnues encore aujourd'hui alors que d'autres ont disparu, le rôle de l'outillage scientifique d'un laboratoire dans l'applicabilité d'une théorie, ainsi que l'existence de collaborations entre profils scientifiques différents. Enfin, les interactions entre théorie et expérimentation d'un point de vue éducatif font l'objet d'une problématique déjà présente dans le passé, même si exprimée sous des formes différentes, ce qui soulève des questions sur son impact sur les pratiques enseignantes du siècle précédent et d'aujourd'hui.

Références bibliographiques

- BATTIMELLI Giovanni, 1986. « On the History of the Statistical Theory of Turbulence », *Revista Mexicana de Física (Suplemento)*, 32 (S1), p. 3-48.
- BODENSCHATZ Eberhard & ECKERT Michael, 2011. « Prandtl and the Göttingen School », in P. A. Davidson, Y. Kaneda, K. Moffatt & K. R. Sreenivasan (eds), *A Voyage Through Turbulence*, Cambridge, Cambridge University Press, p. 40-100.
- CHARRU François, 2021. *Ailes, Nuages et Tourbillons. La mécanique des fluides en France de 1900 à 1950. Une politique nationale*, Cham, Birkhäuser.
- CRASTES Clément, 2019. *Les enseignants du supérieur et l'écoulement interne d'un fluide : modélisation et contextualisation dans différentes disciplines et filières de formation en France et aux États-Unis*, thèse de doctorat, sous la dir. de L. Maurines, Orsay, Université Paris-Saclay.
- DARRIGOL Olivier, 2005. *Worlds of Flow: A History of Hydrodynamics from the Bernoullis to Prandtl*, Oxford, Oxford University Press.
- DEMURO Antonietta, 2018. *La mécanique des fluides en France durant l'entre-deux-guerres : J. Kampé de Fériet et l'IMFL*, thèse de doctorat, sous la dir. de A. Barberousse & R. Tazzioli, Université de Lille, <https://theses.hal.science/tel-02093155> (consulté le 16/04/2024).
- DEMURO Antonietta, 2020. « Mathématiciens et mathématiciens dans les activités de l'IMFL liées à l'aéronautique = (1929-1945) », *Nacelles. Passé et présent de l'aéronautique et du spatial*, 8, <http://interfas.univ-tlse2.fr/nacelles/978> (consulté le 16/04/2024).
- ECKERT Michael, 2006. *The Dawn of Fluid Dynamics: A Discipline Between Science and Technology*, Weinheim, Wiley-VCH.
- FARGE Marie, 1992. « Évolution des théories sur la turbulence développée », in A. Dahan Dalmedico, J.-L. Chabert & K. Chemla (eds), *Chaos et déterminisme*, Paris, Éditions du Seuil (Points Sciences 80).
- KÁRMÁN Theodore von, 1931. *Mechanical Similitude and Turbulence*, National Advisory Committee for Aeronautics (NACA) Technical Memorandum, 611.
- PRANDTL Ludwig, 1927. *Turbulent Flow*, National Advisory Committee for Aeronautics (NACA) Technical Memorandum, 435.
- ROY Sophie, 2012. *125 ans à l'ombre de la tour Eiffel : du bureau central météorologique à Météo France*, Paris, Météo-France.

- SREENIVASAN Katepalli R., 2011. « G.I. Taylor: The Inspiration Behind the Cambridge School », in P. A. Davidson, Y. Kaneda, K. Moffatt & K. R. Sreenivasan (eds), *A Voyage Through Turbulence*, Cambridge, Cambridge University Press, p. 127-186.
- TAYLOR Geoffrey Ingram, 1922. « Diffusion by Continuous Movements », *Proceedings of the London Mathematical Society*, s2-20 (1), p. 196-212, <https://doi.org/10.1112/plms/s2-20.1.196>.
- TAYLOR Geoffrey Ingram, 1935. « Statistical Theory of Turbulence », *Proceedings of the Royal Society A*, 151 (873), p. 421-444, <https://doi.org/10.1098/rspa.1935.0158>.
- TAYLOR Geoffrey Ingram, 1938. « The Spectrum of Turbulence », *Proceedings of the Royal Society A*, 164 (919), p. 476-490, <https://doi.org/10.1098/rspa.1938.0032>.

APPRENDRE ET PENSER LES SCIENCES DANS L'ENSEIGNEMENT ET LA FORMATION SCIENTIFIQUE

VERS UNE INTERDISCIPLINARITÉ

DIDACTIQUE - HISTOIRE DES SCIENCES - ÉPISTÉMOLOGIE

Le monde contemporain doit relever de nombreux défis qui nécessitent un regain d'intérêt pour les métiers scientifiques, en particulier de la part des femmes. Ils requièrent également l'acquisition, par tout citoyen, d'une culture scientifique qui lui permette de penser et d'agir dans des contextes variés. Parmi les leviers envisagés pour l'enseignement des sciences par les textes ministériels français relatifs aux réformes de ces vingt dernières années figure l'introduction de l'histoire des sciences et d'éléments de nature épistémologique. Les attendus institutionnels de cette introduction restent peu explicites et opérationnalisés.

Ce volume vise à participer au développement, en France, de travaux sur l'introduction de l'histoire des sciences et de l'épistémologie dans l'enseignement et la formation scientifique (amplement documentés à l'étranger), tout en apportant un regard critique. Il discute des enjeux éducatifs et sociétaux de cette introduction et des questions qu'elle soulève quant aux objectifs d'apprentissage à poursuivre et des stratégies à mobiliser en classe, ainsi que des méthodologies de recherche à mettre en œuvre.

La réflexion est conduite dans le cadre d'un champ disciplinaire donné, la physique. Différents thèmes au programme d'enseignement du secondaire ou du début du supérieur (la vision, le principe d'inertie, le mouvement des planètes, le temps en mécanique relativiste, la dynamique des fluides) sont abordés. Divers objectifs d'apprentissage (appropriation des concepts scientifiques, raisonnement des élèves, représentations de la/des science(s), pensée critique) et deux stratégies d'enseignement (implicite et explicite) sont envisagés.

Les didacticiens, historiens et épistémologues des sciences réunis ici proposent des regards croisés et complémentaires, conduisant à simplifier ou au contraire à enrichir le discours historique, selon les objectifs d'apprentissage visés. Ils montrent ainsi la fécondité d'une réflexion interdisciplinaire.