



A century of fluid mechanics: 1870–1970 / Un siècle de mécanique des fluides : 1870–1970

Une histoire de l’Institut de mécanique des fluides de Toulouse de 1913 à 1970

*A history of the ‘Institut de mécanique des fluides de Toulouse’*

François Charru

Institut de mécanique des fluides de Toulouse, CNRS–université de Toulouse, 31400 Toulouse, France

INFO ARTICLE

Historique de l’article :

Reçu le 23 décembre 2016

Accepté le 5 mars 2017

Disponible sur Internet le 14 juillet 2017

Mots-clés :

Histoire

Mécanique des fluides

Institutions

RÉSUMÉ

En 1913, Charles Camichel crée le laboratoire d’hydraulique de l’institut électrotechnique de l’université de Toulouse, institut qu’il avait lui-même fondé six ans plus tôt. Ce laboratoire acquiert rapidement une grande notoriété pour la qualité de sa recherche expérimentale et pour ses succès dans la transposition à l’hydraulique des concepts et méthodes de la physique et de la mécanique. En 1930, le ministère de l’Air lui associe un institut de mécanique des fluides, et finance une grande soufflerie. Un siècle plus tard, l’IMFT a diversifié son activité dans de nombreux domaines autour d’enjeux scientifiques et d’applications très variés. Il est l’un des plus grands laboratoires de sa discipline à l’échelle internationale. Cet article en retrace l’histoire jusqu’en 1970, en insistant plus particulièrement sur les remarquables contributions scientifiques des trois premières décennies.

© 2017 Académie des sciences. Publié par Elsevier Masson SAS. Cet article est publié en Open Access sous licence CC BY-NC-ND (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

Abridged English version

In 2016, the ‘Institut de mécanique des fluides de Toulouse’ has celebrated its centenary, precisely its 103 anniversary. The year 2016 also is the 50th anniversary of its association with the CNRS, and the 20th anniversary of the return of the Université de Toulouse (which had become the ‘Université Paul-Sabatier’ in the meantime) among its academic authorities.

This paper recounts this history, starting with the foundation of a Hydraulics Laboratory by Charles Camichel, in 1913, in the context of the development of hydroelectricity in the Pyrenees. From the study of hydraulic questions, the activity quickly evolves towards more fundamental fluid mechanics issues. In 1930, the Air Ministry associates with the Hydraulics Laboratory a Fluid Mechanics Institute, and finances the construction of a large wind tunnel for aeronautics studies. After World War II, Léopold Escande, second director, makes IMFT a reference place for hydraulics studies, and obtains the association with the CNRS in 1966. A profound transformation will follow, marked by a large diversification of the research areas and increasing international influence.

After a panorama of this history in Section 2, we come back in the following Section 3 on the scientific works in the three first decades, from 1913 to 1936. The Hydraulics Laboratory, around Camichel and a few skillful PhD students and collaborators, then shows a period of exceptional creativity, which makes it one of the most active places for fluid me-

Adresse e-mail : francois.charru@imft.fr.

chanics in the world. The study of hydraulic works on small-scale models launches a general reflection on the similitude of fluid flows and dimensional analysis. Sharp experimental techniques are developed, bringing together optics, electricity and mechanics, and reaching spatial resolution below one millimeter and temporal resolutions of the order of one millisecond. The results especially deal with the propagation of elastic waves in conduits and water hammer (§3.1), the similitude of laminar and turbulent, potential and rotational flows (§3.2), fluvial hydraulics (§3.3), experimental techniques and notably chronophotography (§3.4), Bénard–Kármán vortices and the vibrations of stems and stretched wires (§3.5), “secondary” vortices (Kelvin–Helmholtz) (§3.6), and finally transient regimes and the transition to turbulence (§3.7).

1. Introduction

En 2016, l'institut de mécanique des fluides de Toulouse a fêté son centenaire, ses 103 ans précisément. Cette date est aussi l'anniversaire de cinquante ans d'association au CNRS, et des vingt ans du retour de l'université de Toulouse – devenue entre-temps l'université Paul-Sabatier – parmi ses tutelles. Cet article en retrace l'histoire, depuis la fondation par Charles Camichel d'un laboratoire d'hydraulique, en 1913, dans le contexte du développement de l'hydroélectricité dans les Pyrénées, jusqu'en 1970. L'activité initiale, centrée sur les ouvrages hydrauliques, se développe rapidement vers la mécanique des fluides plus fondamentale. En 1930, le ministère de l'Air associe au laboratoire d'hydraulique un institut de mécanique des fluides (IMFT), et finance la construction d'une grande soufflerie pour des études d'aéronautique. Dans l'après-guerre, Léopold Escande, deuxième directeur, fait de l'IMFT un laboratoire de référence pour les études d'hydraulique, et obtient l'association au CNRS en 1966. Une profonde mutation s'ensuivra, marquée par une grande diversification des domaines de recherches et un rayonnement international qui ira croissant.

Après un panorama de cette histoire dans la Section 2 (pour une présentation plus détaillée, voir [49]) on présente dans la Section 3 l'activité scientifique des trois premières décennies, de 1913 à 1936. Le laboratoire d'hydraulique connaît alors une période de créativité exceptionnelle, qui en fait sans doute l'un des lieux les plus actifs au monde en mécanique des fluides. Les études d'ouvrages hydrauliques sur modèles réduits enclenchent une réflexion générale sur la similitude et l'analyse dimensionnelle. Les techniques expérimentales très pointues sont développées, associant optique, électricité et mécanique, qui permettent d'accéder à des résolutions spatiales inférieures au millimètre et des résolutions temporelles de l'ordre de la milliseconde. De remarquables résultats d'hydrodynamique générale sont obtenus, notamment autour des tourbillons de sillage, des instabilités et de la transition à la turbulence. On présente ici, successivement, des résultats sur les ondes dans les conduites (§3.1), la similitude des écoulements (§3.2), l'hydraulique fluviale (§3.3), les techniques expérimentales, et notamment la chronophotographie (§3.4), les tourbillons de Bénard–Kármán et les vibrations de tiges et de fils tendus (§3.5), les tourbillons « secondaires » (Kelvin–Helmholtz) (§3.6) et, enfin, les régimes transitoires et la transition à la turbulence (§3.7).

2. De la création du laboratoire d'hydraulique à l'IMFT des années 1960

Dans les années 1890, l'enseignement supérieur français connaît une profonde réforme sous l'impulsion du ministère de l'Instruction publique et de son directeur de l'Enseignement supérieur, Louis Liard [50,51]. Dans la quinzaine d'universités que le ministère veut privilégier, le nombre d'étudiants croît fortement, tant dans les disciplines académiques traditionnelles que dans les sciences appliquées. Des instituts techniques s'y développent vigoureusement, notamment dans les domaines de l'agronomie, de la chimie et de l'électricité industrielle. Pour cette dernière discipline, trois instituts électrotechniques sont créés, à Grenoble et Nancy, en 1900, puis à Lille, en 1902, sous l'impulsion de fortes personnalités scientifiques. Les autorités politiques locales, de leur côté, appuient fermement la création de ces nouvelles formations techniques, dans lesquelles elles voient une opportunité de développement économique et social. Le contexte industriel est également favorable. À Grenoble, il s'agit de l'essor de l'industrie hydroélectrique et hydraulique autour de la « houille blanche » ; à Nancy, c'est le mécénat de l'industriel belge Ernest Solvay – dirigé notamment vers l'institut chimique créé par Albin Haller – ; à Lille, c'est l'industrie minière et textile, et l'émulation liée à la concurrence de puissantes facultés catholiques.

Toulouse, quant à elle, demeure à la fin du siècle une cité essentiellement agricole et peu industrialisée, loin des grandes routes commerciales et des ressources naturelles propices au développement de l'industrie. Dominée par une faculté de droit séculaire, elle est toutefois incluse par le ministère, de justesse, dans la liste des villes à promouvoir au rang de capitales universitaires. Elle va dès lors s'affirmer sous les efforts conjugués d'un trio d'hommes déterminés et de grand talent : Paul Sabatier et Charles Camichel, universitaires, et Albert Bedouce, maire de Toulouse.

2.1. De l'électricité industrielle à la mécanique des fluides

2.1.1. Création de l'institut électrotechnique de l'université de Toulouse (IET)

Charles Camichel, normalien et docteur en physique de la faculté des sciences de Paris, obtient en 1900 un poste de maître de conférences à la faculté des sciences de Toulouse. Il arrive de Lille, où il avait obtenu son premier poste en 1895 et découvert la physique industrielle. À Toulouse, il se lie avec Paul Sabatier, professeur de chimie bientôt doyen de la faculté des sciences, et futur prix Nobel 1912. Comme Sabatier, Camichel est convaincu de l'intérêt de renforcer les liens entre l'université et l'industrie. Fort de son expérience lilloise, il crée en 1902 un cours public d'électricité industrielle, soutenu par la municipalité, soucieuse de développer l'enseignement des sciences appliquées. L'enjeu est de profiter du

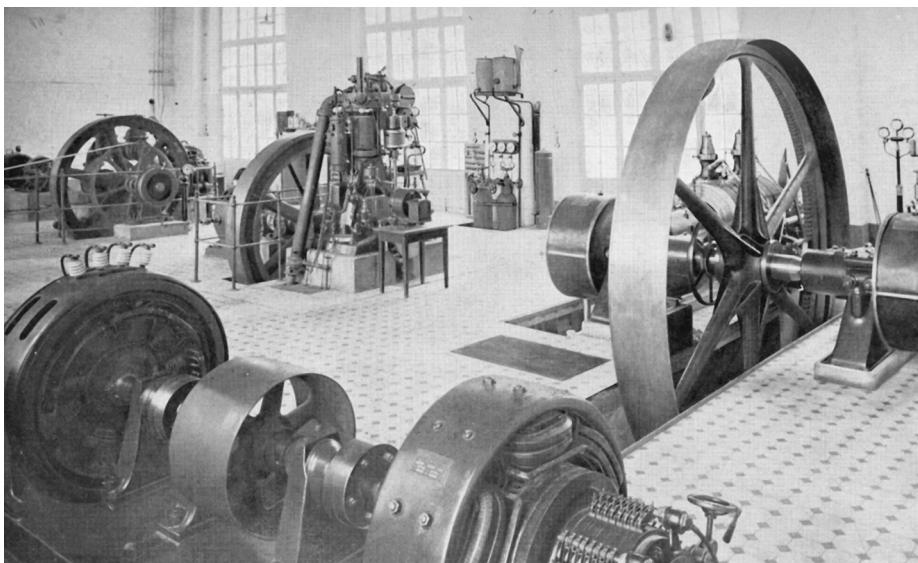


Fig. 1. Le laboratoire de mécanique appliquée de l'IET en 1914 (Arch. IMFT).

développement de l'hydroélectricité pyrénéenne, sous l'impulsion des compagnies de chemins de fer qui électrifient leurs réseaux, pour faire de Toulouse une importante région industrielle, sur le modèle de Grenoble : pour cela, il faut former des ouvriers et des cadres. Ce cours rencontre immédiatement un succès public considérable. Le recteur Claude-Marie Perroud le retire pourtant l'année suivante, pour le confier à Henri Bouasse, professeur de physique à la faculté des sciences – et forte personnalité –, qui le conduira pendant quatre ans.

La décision de Perroud ne satisfait sans doute ni Sabatier ni Camichel, ni la municipalité. En 1906, le nouveau maire Albert Bedouce offre à l'université de financer une chaire municipale d'électricité industrielle, dont le titulaire serait Camichel. Le projet prend de l'ampleur, et aboutit finalement en 1907 à la création de l'institut d'électrotechnique (IET) de l'université de Toulouse, fondation de la Ville. Un institut de chimie et un institut agricole verront le jour peu après.

L'IET comprend une section supérieure, qui forme des ingénieurs, et une section élémentaire, qui forme des conducteurs électriques. Il comprend également un bureau de contrôle pour les essais techniques des appareils d'électricité industrielle. La Ville finance une chaire de professeur et un emploi de chef des travaux, et met à disposition des locaux. Camichel racontera ainsi les débuts de l'institut [52] :

« La Ville de Toulouse me confia les clés de divers locaux vacants, et j'entrepris tout seul une promenade [...] pour fixer l'endroit où s'élèverait plus tard l'institut électrotechnique. [...] J'arrivais, enfin, à la rue Caraman, et mon choix se fixa sur une salle de cette rue. [...] »

« Les débuts de l'institut électrotechnique furent pénibles. [...] Nous n'avions ni appareils ni machines ; les industriels de la région, en particulier la Société toulousaine du Bazacle, nous prêtèrent du matériel. Nous n'avions pas de personnel ; les travaux pratiques avaient lieu, le soir, de dix heures à minuit, et nous faisions nous-mêmes toutes les manipulations. »

En plus des travaux pratiques du soir, des visites d'usines sont organisées le dimanche. Passées ces premières années héroïques, le soutien de la municipalité et du ministère des Travaux publics vont permettre un développement rapide :

« Des cessions successives de terrains, au nombre de sept, par la Ville à l'université, ont permis à l'institut électrotechnique de se développer, d'aboutir d'abord au canal du Midi. C'était en quelque sorte une « fenêtre sur la mer ». Nous avions besoin d'eau pour les machines et les expériences. Ce fut ensuite la construction d'un amphithéâtre, l'aménagement de la salle des machines (Fig. 1) et des laboratoires d'enseignement ; plus tard, les laboratoires de recherche, nos grands réservoirs, la tour, sorte de grande éprouvette, qui s'élèveront un jour en plein Toulouse, réalisation concrète d'une idée que j'avais longtemps envisagée, celles des expériences régulières. »

2.1.2. Création du laboratoire d'hydraulique

Dans un Sud-Ouest de la France pauvre en ressources minières, le développement du chemin de fer incite les compagnies exploitantes à se tourner vers la traction électrique, et à se lancer dans la construction d'usines hydroélectriques dans les Pyrénées et le Massif central. Dans ce contexte, la *Compagnie des chemins de fer du Midi* sollicite Camichel en 1910 pour l'aider à résoudre les nombreux problèmes qui se présentent sur ses installations, d'ordre hydraulique notamment. Pour répondre



Fig. 2. Dans la cour de l'IET, modèle réduit de la Garonne et du Pont-Neuf à Toulouse (Arch. IMFT). Les modèles réduits seront progressivement transférés sur le site de Banlèvre à partir de 1920.

à une demande croissante, Camichel crée en 1913 un laboratoire d'hydraulique dans les locaux de l'IET, et obtient bientôt des subventions importantes du ministère des Travaux publics. L'IET devient «institut électrotechnique et de mécanique appliquée» (IETMA). Les premières études portent sur la mesure de débit dans les conduites, qui fait l'objet de la première publication du laboratoire en 1914 [1]. Les études suivantes portent sur les coups de bâlier, ondes de pression destructrices se propageant dans les conduites lors de manœuvres rapides de vannes [2]. Cette question fait l'objet de la thèse de doctorat ès sciences de Denis Eydoux, en 1919 : c'est la première thèse de l'institut [3]. De nouveaux problèmes se présentent, d'hydraulique fluviale. Il s'agit de mieux comprendre et maîtriser les inondations, et d'aménager les rivières notamment pour la navigation. Les essais sont réalisés sur des modèles réduits installés dans la cour de l'IET (Fig. 2). Les résultats sont extrapolés aux sites réels à l'aide des lois de la similitude des écoulements, sur lesquels Camichel entreprend des travaux théoriques. L'un de ses étudiants, Léopold Escande, y consacre sa thèse [4].

2.1.3. Extension sur l'île du Ramier

Les locaux de l'IET s'avérant insuffisants, Camichel obtient en 1920 un terrain sur l'île du Ramier du Château, sur l'emplacement d'un ancien moulin :

«Quand l'espace manqua, qu'il fallut exécuter des expériences à plus grande échelle avec des débits considérables, nous songeâmes à trouver au voisinage d'un cours d'eau l'emplacement d'un nouveau laboratoire. [...] Comme nous examinions avec [le maire A. Bedouce] la plaine de la Garonne du haut du tertre préhistorique qui se trouve sur les collines de Pech David, il eut l'idée tout à fait remarquable de nous proposer le barrage de Banlèvre.»

Le site de Banlèvre autorise des débits d'eau importants, liés au dénivelé entre les deux bras de la Garonne. Les premières études sont réalisées dans un canal courbe préexistant (Fig. 3), telle l'étude du déversoir du barrage de Pinet, sur le Tarn, confiée par le service central des forces hydrauliques du ministère des Travaux publics. Un nouveau canal est réalisé et mis en service en 1932 (Fig. 4). Long de 117 m, il autorise un débit de 25 m³/s. La fermeture des vannes amont et aval le transforme en bassin des carènes, notamment pour des essais de coques et flotteurs d'hydravions.

En parallèle aux études d'hydraulique, Camichel développe des travaux plus fondamentaux de mécanique des fluides, entouré de collaborateurs de grand talent (Fig. 5). La description de quelques-uns des remarquables résultats obtenus dans les années 1913–1936 fait l'objet de la suite de cet article. Ces résultats témoignent d'échanges avec la communauté scientifique nationale, en particulier avec Henri Bénard à Paris, mais aussi avec l'Allemagne, l'Angleterre et la Russie. Ils font l'objet

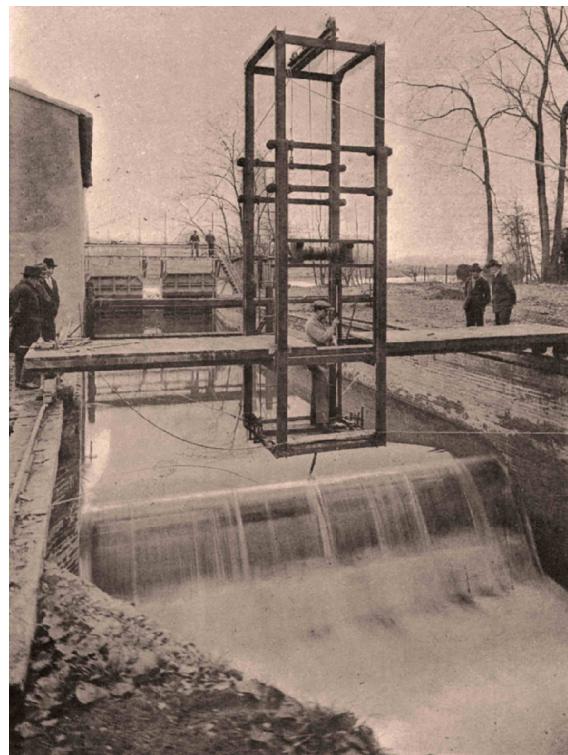


Fig. 3. Le canal courbe du laboratoire de Banlèvre, et nacelle de mesure du débit à l'aide du déversoir de Bazin (Arch. IMFT).

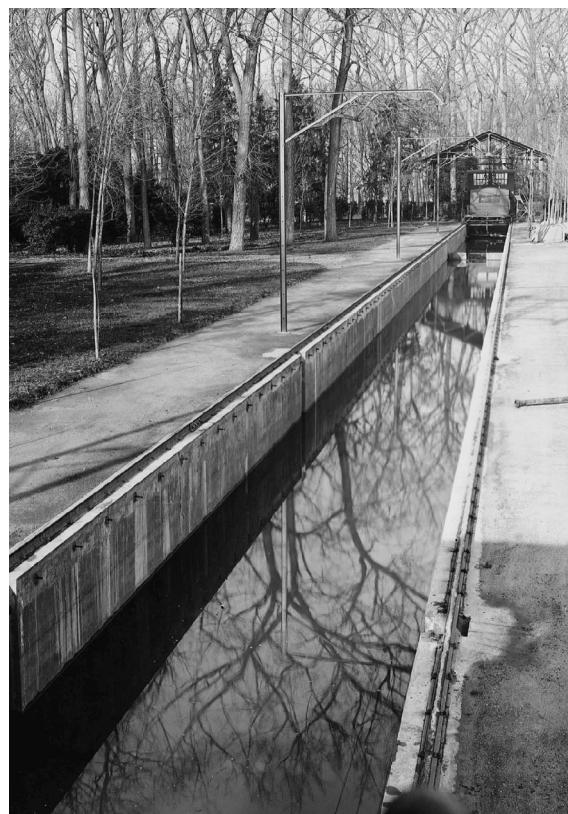


Fig. 4. Le Grand Canal achevé en 1932, vu de l'amont. À gauche, l'emplacement de la future soufflerie, au fond le chariot de remorquage des carènes (Arch. IMFT).

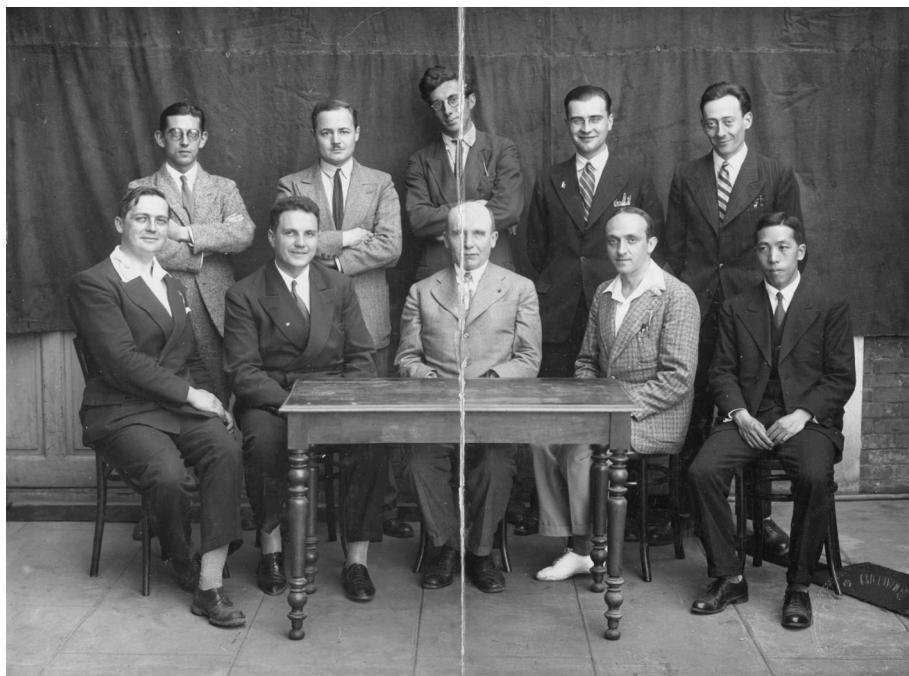


Fig. 5. Photo de famille, vers 1935. Assis de g. à dr. : M. Teissié-Solier, L. Escande, C. Camichel, P. Dupin, X; debout : X, E. Crausse, R. Favre-Artigues, J. Baubiac, J. Lhomme (fonds P. Crausse et archives IMFT).

de sept thèses de doctorat ès-sciences et d'une thèse d'ingénieur-docteur, de rapports et de publications dans des revues nationales, notamment dans les *Comptes rendus de l'Académie des sciences*. La qualité et le rayonnement de ses travaux scientifiques valent à Charles Camichel d'être élu membre correspondant (1922), puis membre non résident (1936) de l'Académie des sciences de l'Institut de France.

2.1.4. Création de l'institut de mécanique des fluides

Afin de stimuler le développement de l'aéronautique française, le ministère de l'Air décide, à la fin des années 1920, la création d'instituts de mécanique des fluides. Toulouse est choisie pour la réputation du laboratoire d'hydraulique de son université, ainsi que Paris, Lille et Marseille. La création de ces quatre instituts, et de chaires dans quelques autres villes, s'inscrit dans un mouvement de renforcement de l'État dans les orientations de la recherche nationale, auquel correspond un recul relatif de l'influence des partenaires politiques locaux qui avaient joué un rôle majeur dans la période précédente. En 1930, l'institut de mécanique des fluides de Toulouse (IMFT) est créé, dont le laboratoire d'hydraulique devient une composante. C'est un institut d'université, doté de personnels propres. Le ministère de l'Air lui verse une subvention annuelle de fonctionnement et rémunère deux emplois créés par l'université de Toulouse : un mécanicien chargé des montages, et une maîtrise de conférences de mécanique des fluides, qui reviendra à Léopold Escande. En 1936, le ministère attribue une importante subvention pour une soufflerie aérodynamique qui entrera en service l'année suivante (Fig. 6). Ce «grand instrument» marque un tournant dans l'histoire du laboratoire, avec l'ouverture d'une nouvelle thématique scientifique et l'arrivée de nouveaux partenaires industriels, notamment les constructeurs d'avions Latécoère (fondateur de *L'Aéropostale*) et Dewoitine.

2.2. L'âge d'or de l'hydraulique

Charles Camichel dirige le laboratoire jusqu'en 1941, puis laisse la place à l'un de ses brillants collaborateurs, ingénieur de l'IET, Léopold Escande. Passionné d'hydraulique, Escande est un organisateur entreprenant et charismatique. En 1943, dans une période d'activité intense de la soufflerie, liée notamment au déplacement à Toulouse de l'activité des souffleries de Lille et de la région parisienne, il obtient de la municipalité une importante extension de terrain pour l'étude des modèles réduits d'ouvrages hydrauliques (Fig. 7). Il embauche de nombreux personnels techniques. Personnage influent au sein de l'industrie hydroélectrique de l'après-guerre, il est sollicité pour des expertises et missions dans de nombreux pays étrangers. Dans les années 1960 d'une France gaullienne attachée au développement de la recherche scientifique (Fig. 8), il occupe plusieurs fonctions à l'échelle nationale, et obtient des crédits importants pour la construction de nouveaux bâtiments. Il est élu à l'Académie des sciences en 1954, et préside l'Association internationale de recherches hydrauliques (AIRH) de 1960 à 1964.

Sur le plan scientifique, la brillante équipe de Camichel s'est dispersée au départ à la retraite de celui-ci, et l'IMFT vit désormais, jusqu'au début des années 1960, sur son héritage. Les remarquables études des années 1913–1936, notamment

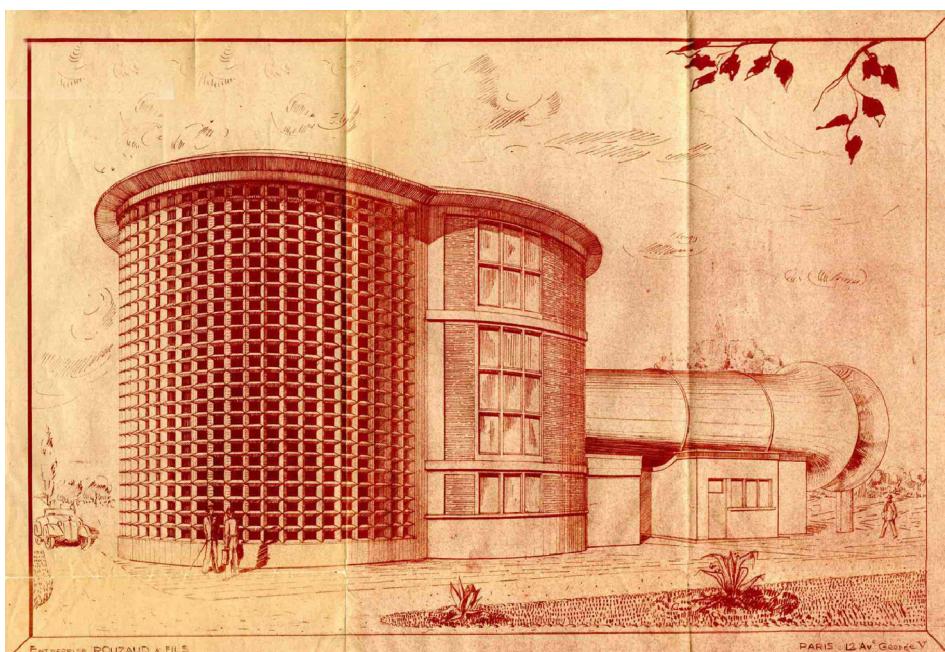


Fig. 6. Esquisse de la soufflerie de l'IMFT, mise en service en 1937. Elle sera abritée par un bâtiment en 1942 (archives IMFT).



Fig. 7. Le «laboratoire plat» des modèles réduits, sur un terrain acquis en 1943, face au bâtiment de la soufflerie (archives IMFT). Cet espace sera couvert en 1962.

sur les tourbillons et les phénomènes transitoires, et sur la visualisation et l'analyse des écoulements, n'inspireront pas de descendance. La soufflerie, très sollicitée dans les années 1940 par l'industrie aéronautique, verra le nombre d'études diminuer fortement dans l'après-guerre, sans donner naissance à des recherches plus académiques. Les études d'ouvrages hydrauliques alimentent l'essentiel de l'activité et des sujets de thèse, autour d'Escande et de ses collaborateurs : Louis Castex, Jean Nougaro, Jean Claria et Albert Claria. Les études portent notamment sur les chambres d'équilibre des conduites forcées, les déversoirs, les évacuateurs de crues, les prises d'eau, et les barrages mobiles. Un résumé des travaux du laboratoire – ceux d'Escande pour l'essentiel – est publié, tous les cinq ans en moyenne et jusqu'en 1963, dans les *Publications scientifiques et techniques du ministère de l'Air*.



Fig. 8. En février 1959, le général de Gaulle visite l'IMFT à l'occasion d'un déplacement à Toulouse (Arch. IMFT).

2.3. Le renouveau des années 1960 et l'association au CNRS

Une nouvelle génération de chercheurs émerge dans les années 1960, qui va renouveler les thématiques du laboratoire. L'électronique se développe dans l'instrumentation, pour des mesures de vitesse, de pression et de hauteur d'eau, mais aussi pour des modèles analogiques d'écoulement. Le calcul scientifique sur ordinateur fait son entrée en 1958, et trouve ses premières applications dans le calcul de la propagation des intumescences dans les canaux découverts. De 1960 à 1970, 21 thèses de doctorat ès sciences sont soutenues, la plupart sur des questions nouvelles : écoulements et transferts dans les milieux poreux, jets turbulents et écoulements décollés, écoulements compressibles et supersoniques, ondes, analyse numérique. Apparaissent également des études sur le transport solide, la pollution et l'hydrobiologie, les fluides non newtoniens, la biomécanique, et les automatismes à fluide.

En 1966, l'IMFT fait partie de la première vague des laboratoires associés au CNRS inventés par Pierre Jacquinot [53] : c'est le LA5. Une direction plus collégiale se met en place, où le directeur est assisté par un conseil de laboratoire. L'activité se structure autour d'équipes de recherches. Le laboratoire est désormais évalué tous les deux ans par un comité de direction composé pour une large part de personnalités nommées par le CNRS. Les orientations scientifiques s'inscrivent dans une politique nationale de contractualisation de la recherche, appuyées sur les « actions concertées » de la Délégation générale à la recherche scientifique et technique (DGRST) et des « actions thématiques programmées » (ATP) du CNRS. Ces financements permettent une recherche sur des questions plus génériques et fondamentales, moins liée à une demande industrielle à court terme.

L'IMFT renoue alors avec sa première tradition, associant étroitement recherches fondamentales et appliquées. L'expérimentation est révolutionnée par l'anémométrie à fil chaud pour la turbulence, puis par les lasers pour l'anémométrie et la visualisation des écoulements, et la gammamétrie pour les milieux poreux. Le traitement du signal, analogique puis numérique (corrélations, spectres), renouvelle l'analyse. La simulation numérique des écoulements se développe, comme nouvel outil d'investigation des phénomènes physiques. Les partenariats industriels se diversifient vers l'industrie pétrolière et nucléaire, la transformation de la matière et de l'énergie, et les transports. Les partenariats avec les organismes publics s'amplifient. Côté académique, l'IMFT multiplie les contacts avec la communauté scientifique nationale et internationale, participe aux programmes européens, et s'engage au niveau international dans les comités éditoriaux des revues et l'animation des sociétés savantes.

Le nombre de thèses soutenues passe de 41 pour la période 1970–1973 (dont 14 doctorats ès-sciences) à 88 pour 1995–1998. Sur cette dernière période, un tiers des docteurs sont étrangers, et deux tiers trouvent un emploi dans le secteur privé. La formation à la recherche est assurée par le centre de 3^e cycle de mécanique des fluides (qui regroupe

quatre établissements universitaires), et le centre de physique et chimie de l'environnement. L'IMFT accueille chaque année plusieurs dizaines de stagiaires de DEA et élèves-ingénieurs. Vis-à-vis de la formation en général, le laboratoire favorise l'émergence de nouveaux enseignements en prise avec la recherche et avec l'industrie.

En 1970, Léopold Escande, directeur de l'IMFT et de l'ENSEEIHT – l'IETMA est devenu *École nationale supérieure d'ingénieurs* en 1948 –, décide de faire sécession de l'université de Toulouse, et fédère quatre écoles d'ingénieurs toulousaines dans un «institut national polytechnique de Toulouse» (INPT), dont il prend la présidence. Les instituts techniques intégrés aux universités, chers à Sabatier et Camichel, ont vécu, vaincus par le clivage ancien entre universités et écoles d'ingénieurs, ravivé après 1968 par la loi Edgar Faure d'orientation de l'Enseignement supérieur. L'université de Toulouse, devenue université Paul-Sabatier (UPS) en 1969, redeviendra tutelle de l'IMFT en 1996, aux côtés de l'INPT et du CNRS, à la faveur de la fusion au sein de l'IMFT du laboratoire de modélisation en mécanique des fluides de l'UPS. L'IMFT acquiert cette année-là le nouveau statut d'unité mixte de recherche.

Pour plus de développements sur l'histoire au-delà de 1970, nous renvoyons à l'ouvrage cité [49], et nous tournons vers les travaux scientifiques de la période 1913–1936.

3. Activité scientifique de la période 1913–1936

3.1. Ondes dans les conduites

En 1910, Camichel est sollicité par Denis Eydoux, ingénieur à la Compagnie des chemins de fer du Midi, sur la question des coups de bâlier dans les conduites forcées des usines hydroélectriques de haute chute, notamment celle de Soułom dans les Pyrénées. Les études alors entreprises marquent une réorientation de l'activité de l'IET vers l'hydraulique et la mécanique des fluides, qui aboutit à la création, en 1913, du laboratoire d'hydraulique de l'université de Toulouse. Dans un ouvrage de synthèse des travaux réalisés, publié en 1918, Camichel pose les enjeux du problème [5] :

«On appelle coup de bâlier les variations de pression qui prennent naissance dans les conduites sous l'influence des changements de vitesse de l'eau. Ces phénomènes ont une grande importance en raison du développement actuel des installations hydro-électriques, dans lesquelles les conduites forcées constituent un organe important et coûteux. Il est indispensable pour l'économie de réduire le plus possible leur épaisseur; il faut pour cela connaître exactement les pressions produites par les divers fonctionnements possibles du régulateur et donner à la paroi l'épaisseur juste suffisante pour que le métal, sous l'influence de la pression statique augmentée des surpressions, travaille au taux habituel de 8 à 10 kg par mm².»

Des travaux théoriques existent, dus notamment à Nicolai Egorovich Joukovski et Lorenzo Allievi [54]. Ce dernier a établi en 1902 le système d'équations différentielles gouvernant le problème et publie en 1913 une méthode de résolution analytique et graphique qui sera référence. Camichel : «On peut résumer, en un mot, le résultat fondamental auquel on arrive : l'étude des coups de bâlier se ramène à l'équation de d'Alembert des cordes vibrantes.» Des expériences précises restent à faire pour cerner la validité des hypothèses faites.

«Nous nous sommes attachés à conduire simultanément des expériences de laboratoire sur une chute artificielle de 17,3 m de hauteur et d'une puissance de 4 chevaux organisée à l'institut électrotechnique de Toulouse, et de grandes expériences industrielles dans une usine d'une puissance totale de 21 000 chevaux [15 MW] (Soulom), répartie en deux chutes distinctes ayant respectivement 120 mètres et 250 mètres de hauteur. [...]»

Cette alliance constante de l'usine et du laboratoire se retrouvera constamment dans notre travail : elle nous a permis de résoudre certaines questions de la plus grande importance, comme la détermination de la vitesse de propagation dans les conduites à caractéristiques variables [diamètre et épaisseur]. Nous avons pu ainsi faire disparaître l'incertitude dans laquelle on se trouvait relativement à cette vitesse, dont la variation apparente sous l'influence de la pression était, en quelque sorte, la pierre d'achoppement qu'on rencontrait au début de toute étude sur les coups de bâlier.»

Les coups de bâlier feront l'objet de nombreuses publications, notamment dans les *Comptes rendus de l'Académie des sciences* et dans *La Lumière électrique*. Ils donneront lieu à un ouvrage de synthèse résumant «les études théoriques et expérimentales [...] poursuivies pendant plusieurs années à l'institut électrotechnique de Toulouse et à l'usine hydro-électrique de Soulom, et qui ont nécessité plus de trois mille expériences distinctes.» [5] Cet ouvrage, de près de 400 pages, obtiendra le prix Boileau de l'Académie des sciences. Paul Painlevé demandera à Camichel de professer, dans le cadre de sa chaire parisienne, des *Leçons sur les conduites*, qui seront publiées [6]. Ces travaux donneront aussi la première thèse de doctorat ès-sciences du laboratoire [3].

3.1.1. Mesure de la pression et de la vitesse de l'eau

Pour la pression, différents types de manomètres-enregistreurs sont mis en œuvre (Garnier-Mathot, Crosby, Bourdon, etc.), selon les contraintes d'utilisation et la rapidité des phénomènes étudiés. Le principe général est que la pression de l'eau agit sur un piston, dont les mouvements sont amplifiés par un système articulé et tracés sur un cylindre tournant enduit de noir de fumée. Des manomètres «utilisant la déformation d'une plaque téléphonique» sont également employés,

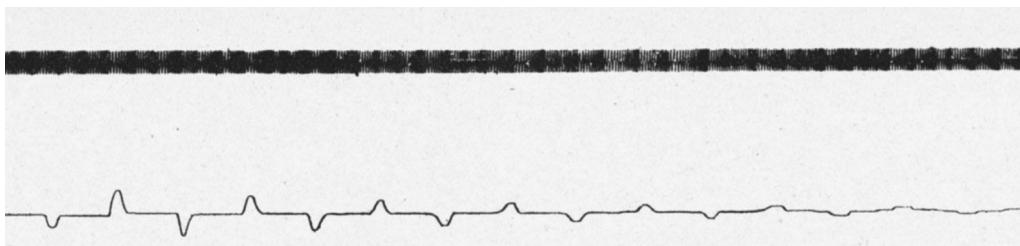


Fig. 9. Enregistrement de la pression après une brève ouverture d'un petit robinet à l'aval d'une conduite (méthode de la dépression brusque); au-dessus : enregistrement d'un diapason au 1/100 s donnant l'échelle de temps [5].

parfois associés à la photographie. Le temps de réponse du manomètre, et la perturbation qu'il introduit dans la mesure, sont soigneusement discutés (par exemple, la variation de volume liée au manomètre doit rester petite devant celle liée à la compressibilité de l'eau).

Le problème de la mesure du débit dans les conduites de gros diamètre des chutes de Pau et de Cauterets, est résolu par un « jaugeur Venturi ». Camichel montre que cet instrument de laboratoire est aussi un instrument de terrain précis et fiable. Ce travail fait l'objet du premier article de revue scientifique de l'IET, dans *La Lumière électrique* [7], puis de la première Note aux *Comptes rendus de l'Académie des sciences* [1]. Il sera aussi publié dans les actes du Congrès de la houille blanche [8] (le congrès lui-même, prévu en septembre 1914, n'aura pas lieu, du fait de la déclaration de guerre).

3.1.2. Détermination de la vitesse de l'onde

Les difficultés expérimentales sont nombreuses. « La purge d'une conduite est la question la plus importante qui se pose au moment d'un essai : il faut la débarrasser complètement de tout l'air qui a pu rester dans ses cavités. [...] L'air s'emmagasiné à la partie supérieure des robinets-vannes et s'accroche aux rivures. » La vitesse de propagation du coup de bâlier est mesurée par la « méthode de la dépression brusque » [9–11] :

« À l'extrémité aval de la conduite étudiée se trouve un petit robinet, qu'on ouvre pendant un temps très court, vis-à-vis du temps θ que l'onde met pour aller et revenir de l'extrémité aval à la chambre de mise en charge. La variation de pression est inscrite par un manomètre, qui enregistre ensuite cette même variation de pression, réfléchie à l'extrémité amont et changée de signe et ainsi de suite. On obtient ainsi dans le graphique de la pression une série d'encoches, tantôt dans un sens, tantôt en sens inverse, qui permettent de déterminer très commodément la vitesse a . Le temps est inscrit sur le cylindre enregistreur au moyen d'un diapason ayant comme période un centième de seconde » (Fig. 9).

Dans une expérience typique, la vitesse mesurée vaut 1312 m/s, la formule d'Allievi donne la valeur très proche de 1315 m/s.

3.1.3. Résonances

Lorsqu'une conduite est soumise à une perturbation périodique, par exemple une modulation du débit réalisée par un robinet tournant, des résonances se manifestent avec le mode fondamental, de période $4L/a$, ou avec un harmonique. « Au moment de la résonance, l'oscillation s'épure et la courbe devient sinusoïdale [la conduite vibre en 1/4 d'onde]; la même remarque s'applique aux harmoniques. [...] Au moment de la résonance des harmoniques impairs, le débit passe par un minimum [...] La comparaison de la conduite avec un tuyau sonore nous indique que pendant la résonance du fondamental, la phase pour tous les points de la conduite sera la même. »

3.1.4. Conduites à caractéristiques multiples

Les conduites industrielles sont en général constituées de plusieurs tronçons, d'épaisseurs et parfois de diamètres différents. Dans ces conduites « à caractéristiques multiples », chaque tronçon possède sa propre vitesse de propagation, et le calcul doit en tenir compte. La Fig. 10 compare, pour une fermeture lente du distributeur, les pressions mesurées aux pressions calculées en modélisant la conduite avec trois tronçons. Le calcul associe solutions analytiques et résolution numérique « à la main » par différences finies. La correspondance des tracés, mauvaise avec un seul tronçon dès l'instant $t \approx 8L/a$, s'avère bien meilleure avec seulement deux tronçons.

3.2. Similitude des écoulements dans les modèles réduits

3.2.1. Lois de la similitude

L'étude à échelle réduite des écoulements naturels ou industriels s'impose comme le bon moyen d'expérimenter dans des conditions mieux contrôlées. Dès lors se pose la question de l'extrapolation des résultats du modèle réduit vers l'ouvrage réel. Cette transposition requiert que les écoulements soient « semblables », et les conditions de cette similitude doivent être fondées sur l'analyse dimensionnelle des équations de la mécanique des fluides. Au-delà de la motivation industrielle, cette analyse met sur la voie d'une compréhension plus profonde de l'hydrodynamique [12] :

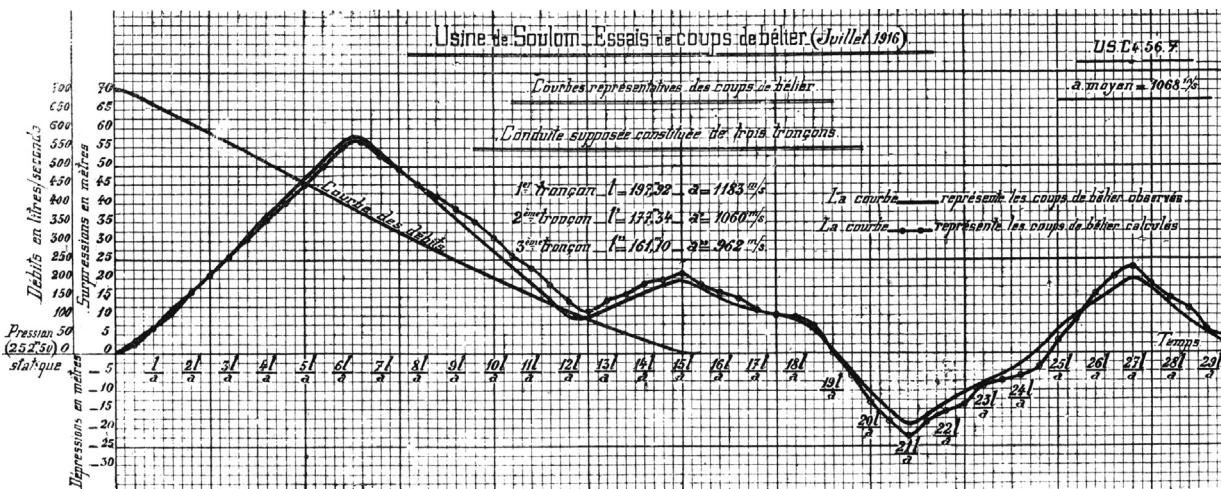


Fig. 10. Fermeture lente du distributeur au pied de la conduite forcée de l'usine de Soulom : pression au distributeur en fonction du temps, mesure et calcul pour une conduite représentée par trois tronçons d'épaisseurs différentes [5].

« Cette question présente, du point de vue technique, un intérêt considérable, car les lois de la similitude commandent la technique des modèles réduits dont l'emploi se généralise, avec le développement des usines hydroélectriques, pour la solution de tous les problèmes qui, en raison de leur complexité, échappe au calcul. Mais la similitude est également intéressante au point de vue théorique, car elle donne des renseignements précieux sur la nature des phénomènes mis en jeu et l'expression des termes qui peuvent les représenter. »

On doit à Hermann Helmholtz (1873) et à lord Rayleigh (1892) les premières présentations d'un principe de « similitude dynamique », dont Joseph Fourier avait posé les bases en 1822 [55, §365–371] [54, p. 213]. William Froude dans les années 1870 et, avant lui, Ferdinand Reech, en ont empiriquement trouvé les lois pour la résistance à l'avancement des navires [56, p. 277]. Osborne Reynolds en découvre en 1883 une autre manifestation dans ses études de la transition à la turbulence dans une conduite [56, p. 256]. L'investigation des lois de similitude reste à faire dans les situations variées rencontrées avec les modèles réduits. Ce sera l'objet de la thèse de Léopold Escande [4], qui posera les conditions de similitude de chacune des grandes classes d'écoulements : écoulements en charge ou à surface libre, écoulements visqueux ou non visqueux (ce dernier cas comprenant, d'une part, les écoulements potentiels et, d'autre part, les écoulements pleinement turbulents où la viscosité est sans effet sur la similitude). L'analyse d'Escande suit dans son principe celles de Jean Boussinesq et de Marcel Brillouin, qui avaient eux-mêmes repris et développé l'analyse de Helmholtz et de Horace Lamb. La question de la similitude des écoulements guidera désormais l'essentiel des travaux de Camichel et du laboratoire d'hydraulique :

« En collaboration avec M.L. Escande, j'ai étudié, du point de vue de la similitude, les modes d'écoulement les plus divers : chambres d'eau, déversoirs, conduites, collecteurs, corps immersés. Les phénomènes hydrauliques sont très complexes et font intervenir un grand nombre d'éléments : pesanteur, viscosité, rugosité des parois, capillarité, cavitations, entraînement de l'air, cohésion et hétérogénéité des matériaux dans le cas des affouillements, etc. Il en résulte des conditions multiples et incompatibles qui rendraient la réalisation de la similitude impossible, si, dans la plupart des cas, parmi tous les phénomènes mis en jeu, l'un d'eux n'était prédominant vis-à-vis des autres. Il suffit dès lors de réaliser la condition de similitude correspondant à ce phénomène, les autres n'intervenant que comme des termes correctifs dont il importe de déterminer l'ordre de grandeur.

Par exemple, dans les mouvements à surface libre intéressant l'hydraulique fluviale, on doit envisager la pesanteur et la viscosité, c'est-à-dire la condition de Reech–Froude et celle de Reynolds. Or, ces deux conditions sont incompatibles, en général ; la similitude serait donc impossible si l'existence du potentiel des vitesses n'éliminait presque complètement l'influence de la viscosité et par conséquent la condition restrictive de Reynolds. » [13].

Les modèles réduits présentent par ailleurs des avantages, comme « les faibles durées des phénomènes, [...] tandis que dans les modèles réels les phénomènes pourraient passer inaperçus du fait de leur lenteur » [14]. Ils permettent aussi la mise en évidence de seuils pour le nombre de Reynolds.

Les premières vérifications des conditions de similitude portent sur la comparaison des débits Q_1 et Q_2 de deux écoulements visqueux dans deux conduites de diamètres dans un rapport $D_2/D_1 = \lambda$; ou sur la comparaison des vitesses, mesurées par chronophotographie, en deux points homologues de l'écoulement autour d'un obstacle [15]. Inversement, le caractère potentiel d'un écoulement peut être vérifié par la condition de similitude : pour un réservoir percé d'un orifice en

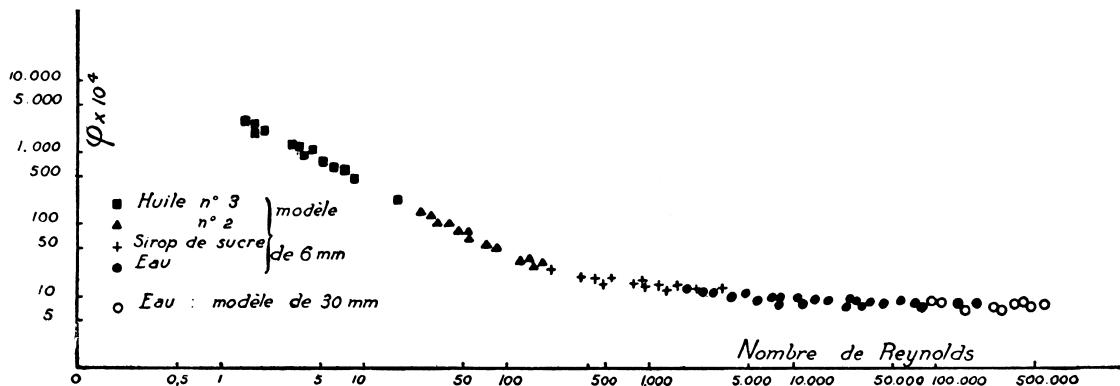


Fig. 11. Fonction φ en fonction du nombre de Reynolds pour un coude à angle droit, pour différents liquides. Le rapport des viscosités extrêmes est de 373 [13,17].

mince paroi, les temps de vidange de l'eau et d'une huile sont identiques [16]. La question de la chute de pression Δp dans un coude fait l'objet d'une étude détaillée. L'analyse dimensionnelle suggère de considérer le coefficient sans dimension

$$\varphi = \frac{\Delta p}{\rho V^2} \quad (1)$$

où V est la vitesse moyenne dans une section du coude. La Fig. 11 montre la variation de ce coefficient avec le nombre de Reynolds. Il apparaît d'abord que les points s'alignent sur une même courbe, indépendamment de la dimension du coude et de la viscosité du fluide – le rapport des viscosités extrêmes est ici 373. On voit ensuite que le coefficient φ décroît pour les nombres de Reynolds inférieurs à 1000 environ, puis atteint une valeur constante. La décroissance correspond à un régime dominé par les effets visqueux, tandis que le palier correspond à un régime dominé par l'agitation turbulente.

3.2.2. Similitude des «ouvrages courts»

Dans la perspective de l'extrapolation du modèle réduit à l'ouvrage réel, l'existence d'un régime d'écoulement indépendant de la viscosité, où le coefficient φ est constant, est particulièrement important. Les ouvrages situés dans ce régime sont appelés par Camichel «ouvrages courts» [18]. Pour ces ouvrages, «les pertes de charge, variant suivant le carré de la vitesse comme toutes les autres pressions, n'introduisent pas de condition particulière pour la réalisation de la similitude, et les relations demeurent les mêmes que pour les fluides parfaits.»

«Cette notion d'ouvrage court est particulièrement importante, parce qu'elle m'a permis de préconiser, pour ces ouvrages, une technique des modèles réduits sûre et économique : pour un ouvrage déterminé, on construira la fonction : $\varphi(R)$ jusqu'à ce que l'on atteigne ce que j'appelle le seuil, c'est-à-dire le nombre de Reynolds à partir duquel la fonction φ conserve une valeur constante. Cette valeur sera celle qu'il conviendra d'appliquer à l'ouvrage réel. Il n'y aura pas évidemment intérêt à continuer des études sur des modèles mettant en jeu des nombres de Reynolds plus élevés et c'est en cela que consiste l'économie de la méthode.» [12]

Une étude emblématique illustrant cette notion est celle du remplissage de la cale de radoub du port du Havre (Fig. 12) [14]. Cette cale, de longueur $L = 335$ m, «l'une des plus grandes existant dans le monde», est remplie par gravité, à marée haute, à travers des aqueducs parcourus par des débits de l'ordre de $Q = 100 \text{ m}^3/\text{s}$. Une question est celle du temps de remplissage. Un modèle réduit réalisé dans le canal courbe de Banlieue permet de valider la similitude de la loi de remplissage en fonction du temps (Fig. 13a). La fonction $\varphi(R)$ des aqueducs, «jamais étudiée, à notre connaissance, pour des nombres de Reynolds aussi considérables», met bien en évidence les deux régimes, sur une gamme de nombre de Reynolds s'étendant sur plus de trois ordres de grandeur (Fig. 13b).

3.2.3. Résistance à l'avancement de corps tombants

La question de la résistance à l'avancement d'un obstacle dans un écoulement reste largement ouverte dans les années 1930 [57]. Deux théories ont ouvert la voie à une résolution du paradoxe de d'Alembert : les surfaces de discontinuité de Helmholtz et Levi-Civita, d'une part (voir §3.4.3), et la couche limite de Prandtl, d'autre part. Du point de vue des applications, toutefois, la traînée reste encore déterminée de façon essentiellement empirique. C'est dans ce contexte que Camichel engage Jean Baubiac dans une thèse sur la similitude des lois de chute d'un corps tombant par gravité dans un fluide au repos [19]. Les corps étudiés, proposés par le ministère de l'Air, sont des cylindres tombant verticalement, parallèlement à leur axe de symétrie, et munis d'un empennage afin de stabiliser leur chute. La chute de corps de diamètre centimétrique est étudiée dans la «tour E» et le «bassin D» de l'IET. Un fil attaché au corps fait tourner un tambour situé en haut du bassin ; la rotation du tambour, filmée par une caméra rapide à 250 images par seconde, permet de déterminer la loi de la chute (transitoire de l'accélération et vitesse terminale). Des expériences sur des corps de dimensions métriques

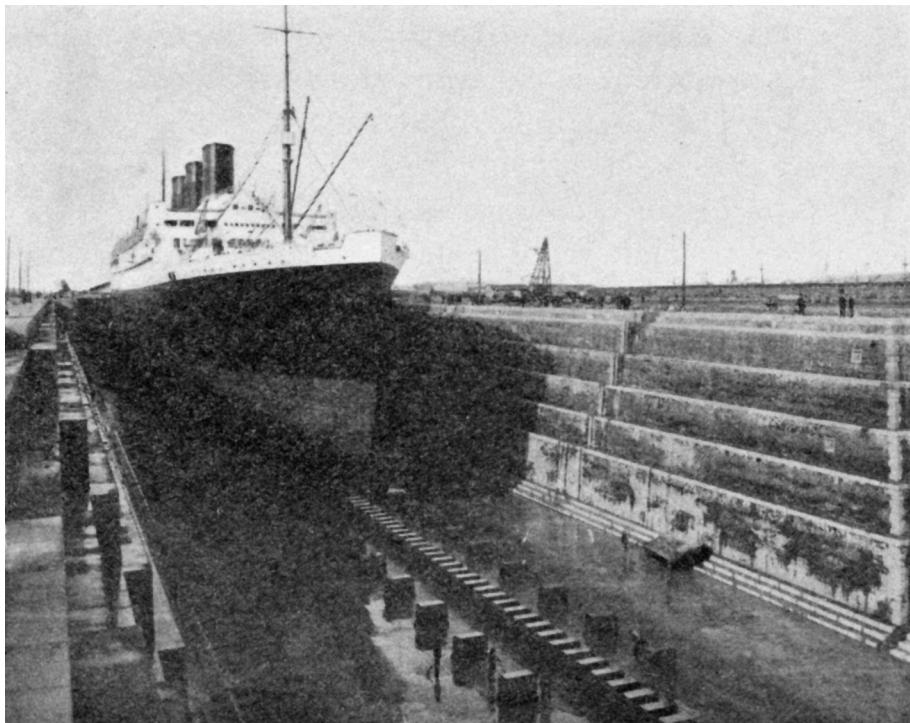


Fig. 12. Grande forme de radoub du port du Havre. Longueur : 313 m, débit lors du remplissage : 100 m³/s; puissance mise en jeu : 11 MW [16].

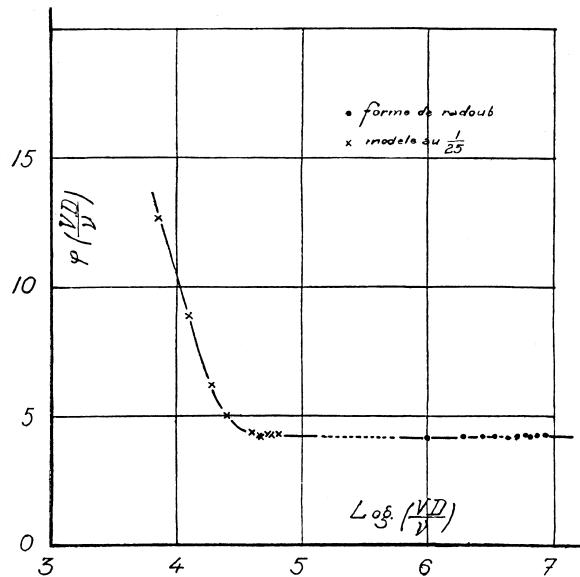
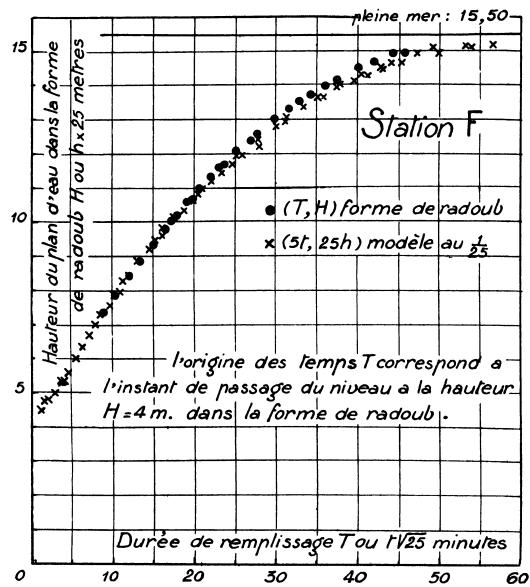


Fig. 13. Cale de radoub du Havre : (a) loi de remplissage de l'ouvrage réel et de son modèle réduit à l'échelle 1/25 ; (b) fonction $\varphi(R)$ [14].

sont menées à partir d'un radeau installé sur le lac d'Oô, lac pyrénéen de 80 mètres de profondeur. Le radeau, construit par la Compagnie d'électricité industrielle de Luchon, est équipé d'une machine d'Atwood qui permet de faire varier le poids apparent du corps (Fig. 14). De la loi de vitesse, est déduite la force hydrodynamique de résistance à l'avancement. La Fig. 15 montre la variation de cette force, normalisée par SV^2 , produit de la section de l'obstacle et du carré de sa vitesse, en fonction du nombre de Reynolds du corps. Lorsque le régime permanent est établi, cette force normalisée, indépendante de la dimension du corps, apparaît bien constante lorsque le nombre de Reynolds est suffisant grand, c'est-à-dire que « le phénomène considéré est indépendant de la viscosité propre du liquide. »



Fig. 14. Radeau des expériences du lac d'Oô, permettant d'utiliser des profondeurs de 80 mètres [19].

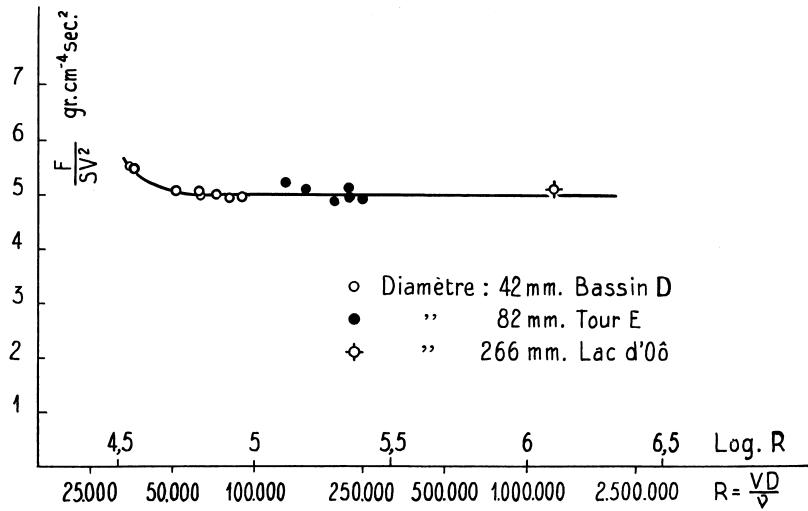


Fig. 15. Expériences du lac d'Oô. Courbe des résistances du cylindre immergé dans l'eau en fonction des nombres de Reynolds calculés à partir des vitesses en régime permanent [19].

Dans le régime transitoire d'accélération du corps, à partir du repos, l'étude révèle qu'à l'instant où la vitesse du corps est $V(t)$, la force hydrodynamique est supérieure à la force dans un mouvement permanent à la même vitesse V (Fig. 16). Le surcroît de force est lié au fait que le fluide autour de l'obstacle doit lui-même être accéléré, et qu'à la masse du corps doit donc être associée une «masse ajoutée» de fluide (cette expression de «masse ajoutée» n'est toutefois pas explicitée).

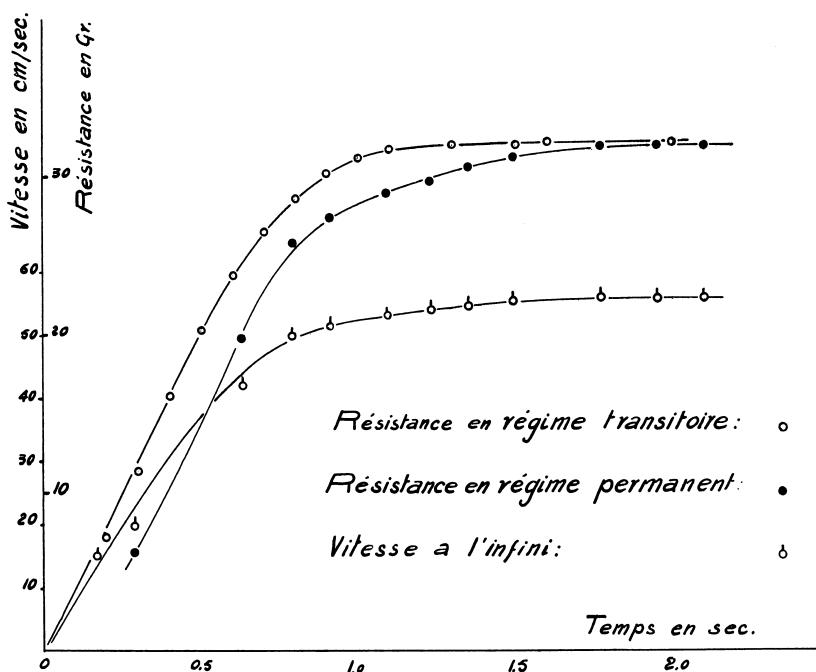


Fig. 16. Résistance hydrodynamique au cours du régime transitoire d'accélération, et comparaison au régime permanent de même vitesse [19]. L'écart entre les deux courbes de résistance traduit l'effet de la masse ajoutée.

Ces expériences permettent également de clarifier ce que Camichel appelle les «éléments linéaires hydrauliques», c'est-à-dire certaines échelles caractéristiques de l'écoulement qui doivent elles-mêmes vérifier des relations de similitude. Ainsi, pour un corps tombant, «les expériences ont montré que la distance L parcourue par le corps depuis la position initiale jusqu'à la position à partir de laquelle le régime permanent de la vitesse est établi, est constante et indépendante de la vitesse atteinte. Pour un corps semblable au premier, la distance parcourue dans le régime transitoire varie proportionnellement à λ [le facteur géométrique]» [14].

3.3. Hydraulique fluviale

Les fleuves sont le siège d'une grande variété de phénomènes hydrauliques naturels, tels que les crues, ou liés à l'activité humaine. Parmi ces derniers, on peut citer les contractions provoquées par les piles de ponts, ou le décollement d'une lame déversante au-dessus du parement aval d'un barrage, ou les phénomènes alternatifs d'affouillement et de remblaiement observés à l'aval d'un ouvrage sur un fond de sable. Nous limitons ici la présentation aux «effets produits dans un fleuve par la présence d'un barrage composé d'éléments mobiles et par la manœuvre de ces derniers.» [20] Les enjeux concernent la protection des rives et du fond du cours d'eau, et l'obtention des conditions les plus favorables à la navigation.

3.3.1. Cas d'une seule veine dans un système en charge

Une situation typique est celle d'une veine horizontale de section rectangulaire débouchant dans une conduite également rectangulaire, de même profondeur, mais de largeur plus grande, le système ayant un plan de symétrie vertical (Fig. 17).

«[On observe alors] des indéterminations de la veine liquide qui ne peut demeurer dans la position axiale de symétrie et qui s'incurve vers l'une ou l'autre des deux parois du canal, sans qu'il soit possible de prévoir avant la manœuvre quelle sera celle des deux parois vers laquelle ira finalement la veine. Voici l'explication qu'on peut en donner :

Sous l'influence d'une *perturbation accidentelle*, la veine primitivement rectiligne s'incurve légèrement; il en résulte une différence de pression entre les deux régions de part et d'autre de la veine, la pression diminuant dans la région à laquelle la veine présente sa concavité, et augmentant dans l'autre, de telle sorte que la déviation initiale du jet s'accentue jusqu'au moment où un équilibre s'établit et donne naissance à une veine courbe stable. [...]

Si le système est symétrique et construit avec beaucoup d'exactitude, la probabilité pour que la veine s'oriente dans un sens déterminé est égale à 1/2. Tel est le phénomène de l'indétermination d'une veine liquide.

Pour préciser les conditions dans lesquelles ces phénomènes se produisent, il fallait les examiner dès leur origine, c'est-à-dire à partir des nombres de Reynolds les plus faibles. [...]

Pour de très faibles vitesses, les filets fluides suivent rigoureusement les parois sans décollement [Fig. 17]. Pour des vitesses plus grandes, on voit apparaître de part et d'autre de la veine qui débouche du canal T deux rouleaux logés

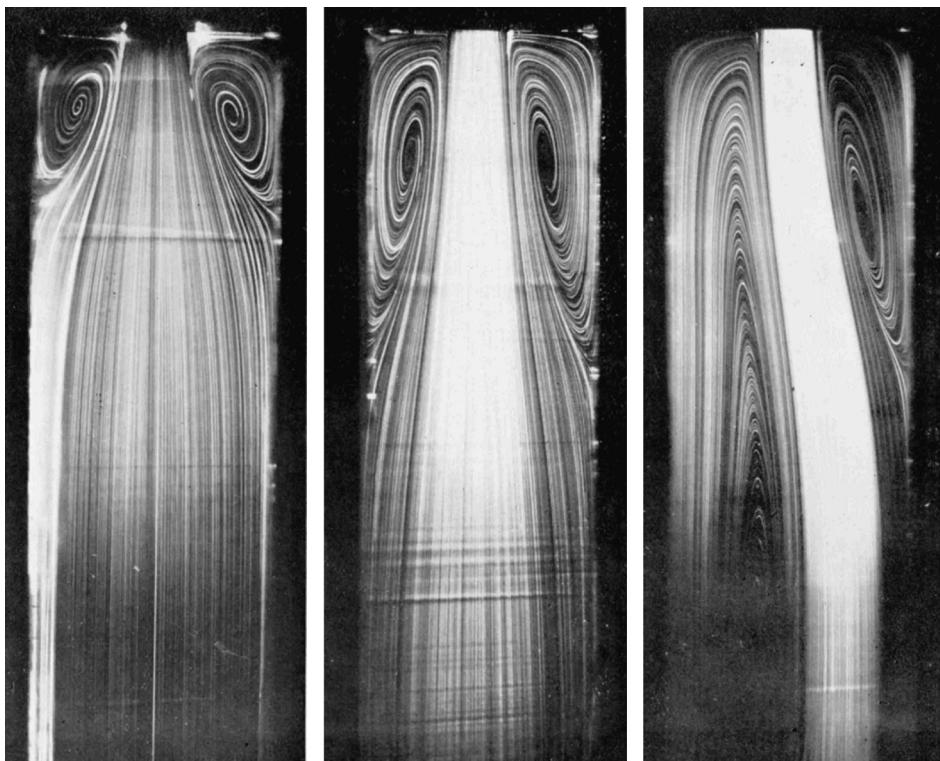


Fig. 17. L'écoulement à la sortie d'un élargissement brusque, symétrique à petit nombre de Reynolds, s'oriente vers l'une ou l'autre des parois latérales pour $Re > 34$ [14].

symétriquement dans les angles amont de la section élargie. Pour des vitesses encore plus élevées, la section de la veine diminue, la symétrie disparaît : la veine liquide s'accroche à l'une ou à l'autre des parois. [...] Le nombre de Reynolds critique [correspondant à l'apparition de ce dernier phénomène] est d'environ 34.

Pour aller plus loin dans cette étude et faire apparaître un paramètre mesurable, nous avons songé à utiliser pour l'orientation de la veine, une *cause artificielle* suffisante pour masquer la plus forte des *causes accidentelles* qui provoque son orientation. Divers procédés peuvent être employés parmi lesquels l'un des plus caractéristiques consiste à utiliser l'action sur les rouleaux d'un fil fixe qui peut avoir de très petites dimensions.»

Le fil, placé juste à l'aval de l'élargissement, peut être déplacé transversalement dans la veine. La vitesse de l'écoulement est augmentée très progressivement par l'ouverture lente d'un robinet.

« Nous avons constaté que pour les nombres de Reynolds très faibles, le fil n'a pas d'action. Au voisinage du critérium [$R_c = 34$] et dans des limites restreintes, il est possible en déplaçant le fil de a en b de modifier l'orientation de la veine et de l'amener à se détacher d'une paroi, celle de droite, pour s'accrocher à l'autre, celle de gauche. Cependant, dès qu'on ramène le fil en arrière, de b en a , la veine revient peu à peu vers la paroi qu'elle avait abandonnée sous l'influence du fil. Tout se passe comme si la veine était attirée par le fil. Quand le nombre de Reynolds continue à augmenter, la durée de ce retour de la veine vers la paroi croît rapidement et devient infinie, la veine conserve alors la position que lui a donnée le fil ; l'action est permanente. »

Il en est de même pour des nombres de Reynolds plus élevés ; le fil possède encore une action sur l'orientation de la veine, mais la durée de cette action répulsive croît avec le nombre de Réynolds et, pour un nombre de Reynolds plus élevé [voisin de 55], elle devient infinie. Quand il en est ainsi, le fil n'a plus d'action sur la veine, quelle que soit la position qu'on lui fait occuper vis-à-vis des deux parois. »

Voilà Camichel et son équipe pionniers du « contrôle des écoulements » !

3.3.2. Systèmes à surface libre

« Les mêmes phénomènes s'observent dans les systèmes à surface libre que j'ai étudiés avec MM. Escande de Sabathé. Par exemple, dans un canal de 4 mètres de largeur (laboratoire de Banlieue), une veine issue d'une fente centrale de 1,40 m de largeur, débitant 3600 litres par seconde, est repoussée vers la rive opposée par une tige verticale de 2,5 cm de diamètre, placée [tangentiellement à la veine] à 2 mètres à l'aval de la fente, dès le début du mouvement (Fig. 18). »

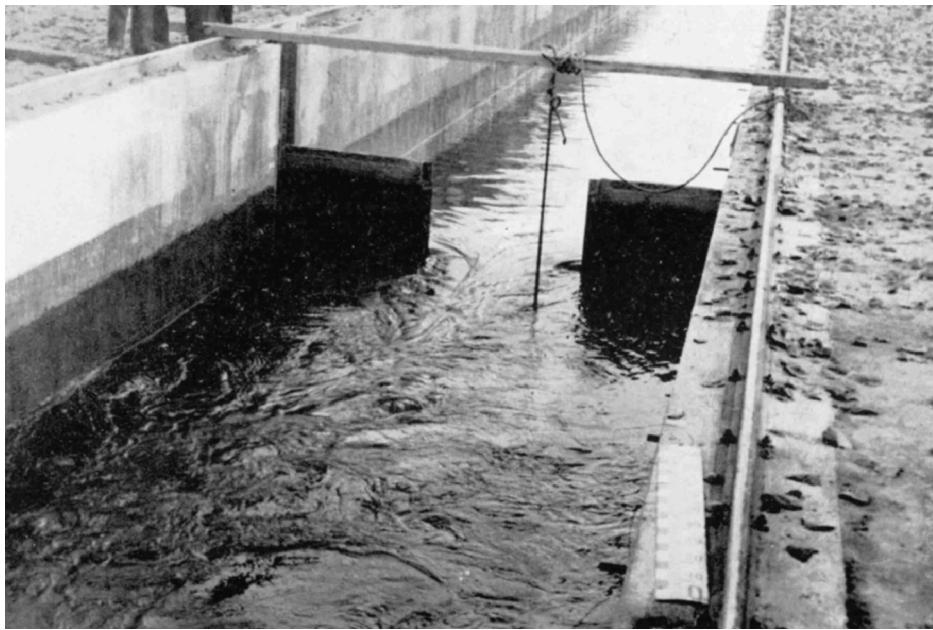


Fig. 18. Laboratoire de Banlieue de l'université de Toulouse. Une tige de 2,5 cm de diamètre permet d'imposer l'orientation de la lame d'eau à l'aval d'un élargissement brusque, et lève ainsi l'indétermination initiale [21,14].

La veine étant ainsi orientée, reste stable et conserve la même position si l'on enlève la tige ou si on la déplace dans le canal, dans la veine et en dehors de la veine. On a donc affaire dans ce cas à un système dans lequel l'état final est variable avec les mêmes conditions initiales (position de la tige).

Si l'on attend que la veine se soit stabilisée contre une paroi, pour essayer de la ramener contre la paroi opposée, la chose demeure encore possible, mais au prix de dispositifs mettant en jeu une puissance beaucoup plus considérable, puissance empruntée au milieu ou provenant d'une source extérieure d'énergie, par exemple par la rotation à une vitesse élevée, de palettes tournant à autour d'un axe vertical. Il y a donc une différence essentielle entre les phénomènes du régime transitoire et du régime permanent. [...]

On voit donc qu'une cause infime mais existante comme condition initiale au début du phénomène et pouvant même disparaître ensuite, a beaucoup plus d'action qu'un élément relativement beaucoup plus important mais intervenant seulement après la fin du régime transitoire.»

3.3.3. Expériences sur modèles réduits et au barrage de Vives-Eaux

Les phénomènes décrits ci-dessus se retrouvent dans les configurations plus complexes rencontrées en hydraulique fluviale. Les expériences réalisées sur le barrage de Vives-Eaux, près de Melun (Fig. 19), et sur son modèle réduit à l'échelle 1/25, en sont une illustration. Les 74 hausses mobiles de ce barrage autorisent «toutes les combinaisons possibles en ce qui concerne le nombre et la largeur des ouvertures à pratiquer dans l'ouvrage».

On observe ainsi que, pour une ouverture unique, «la veine ne demeure jamais dans l'axe de l'ouverture mais s'incurve toujours vers l'une ou l'autre des deux rives.» Si l'ouverture est proche de l'une des rives, la veine s'incurve vers cette rive. Si l'ouverture est située dans la partie centrale, la veine s'incurve vers l'une ou l'autre rive, qui peut être choisie en déplaçant progressivement la passe ouverte à partir de la gauche ou de la droite. À une même position de l'ouverture peut ainsi correspondre deux orientations différentes de la veine, selon le «chemin» emprunté pour arriver à cette position : le phénomène présente une hystérésis.

«On pourrait citer de nombreux exemples de phénomènes analogues. Dans l'écoulement sur un déversoir de Bazin, entre certaines limites de charge, on peut avoir pour un même débit une nappe ondulée ou une nappe noyée auxquelles correspondent deux valeurs différentes du niveau aval ; la solution dépend du fait que l'on opère par charge croissante ou décroissante. De même, dans les évacuateurs de crues à galerie souterraine, on peut avoir des tirants d'eau différents pour un même débit suivant qu'on opère à débit croissant ou décroissant entre certaines limites, etc.»

Dans le cas de deux ouvertures A et B, on voit se produire un phénomène caractéristique, l'attraction des veines (Fig. 20).

«Les courants issus des deux vannes symétriques A et B se réunissent et forment ainsi un courant résultant unique qui lui-même subit un phénomène d'indétermination en ce sens qu'il peut être dirigé vers l'une ou l'autre des deux rives.

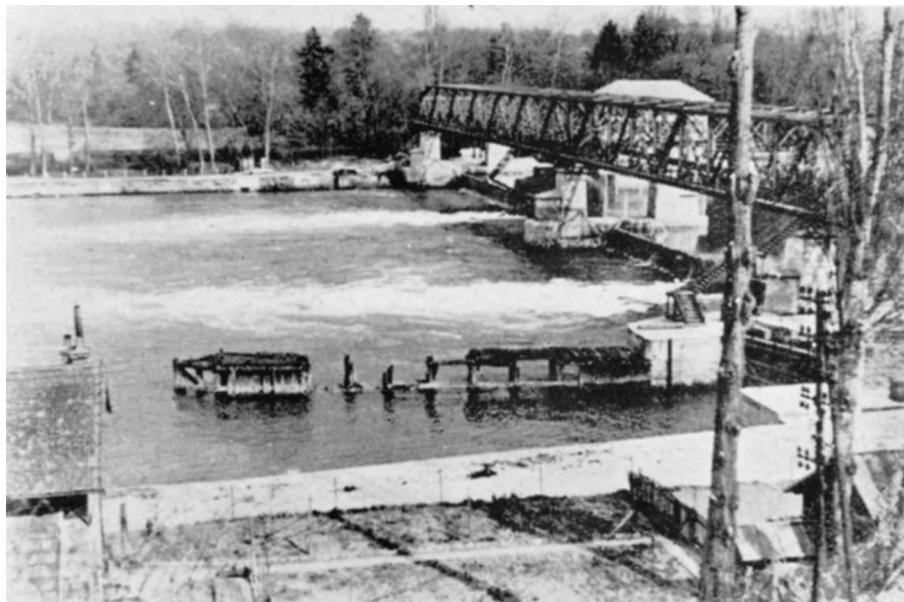


Fig. 19. Veines convergentes à l'aval du Barrage de Vives-Eaux sur la Seine [14].

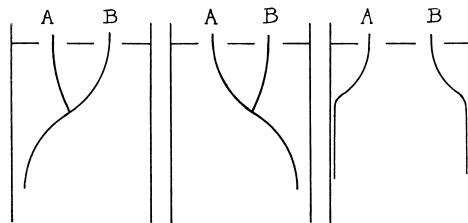


Fig. 20. Schémas des trois configurations possibles résultant de l'ouverture de deux vannes : confluence vers la rive droite, vers la rive gauche, ou divergence des veines [14].

Le cas des ouvertures des vannes exécutées successivement et progressivement est très important ; on ouvre par exemple la vanne A et on laisse le régime permanent s'établir, on ouvre ensuite progressivement la deuxième vanne B. Les deux veines s'attirent et le courant résultant de leur confluence se dirige du côté de la rive la plus voisine de la vanne ouverte la première.

Le résultat final dépend donc de l'ordre des manœuvres : les opérations ne sont pas commutatives.»

Si toutefois les deux ouvertures sont situées à l'extérieur d'une région centrale, alors l'attraction des parois domine l'attraction des veines, et ces dernières divergent.

«[Enfin.] si les ouvertures A et B se trouvent à la limite de la zone centrale et des zones latérales, l'attraction des parois équilibrant sensiblement l'attraction mutuelle des veines, on peut obtenir avec indétermination, soit la divergence des veines, soit leur convergence, ce qui correspond à une triple solution avec indétermination.

Avec un système de tiges convenablement placées, on peut encore dans ce cas, en utilisant le régime transitoire, supprimer l'indétermination et obtenir celle des trois solutions possibles que l'on aura choisie à l'avance (Fig. 21).»

La situation d'un fond affouillable, constitué de sable fin par exemple, introduit une différence importante avec ce qui précède : l'état d'équilibre final est symétrique et indépendant de la configuration initiale du lit. Ainsi, un talus disposé initialement en dehors du plan de symétrie de l'écoulement est progressivement érodé, et un fond symétrique est finalement restauré.

Ces travaux sur les solutions multiples en hydraulique sont prolongés par l'équipe de Camichel dans plusieurs directions, notamment vers les écoulements oscillants, induits par exemple par les marées, où l'orientation de la veine à l'aval d'une contraction est sensible aux tourbillons résiduels formés lors de l'alternance précédente. Une autre direction concerne l'utilisation des crues : par l'aménagement naturel ou artificiel du lit majeur d'une rivière, une crue peut provoquer un changement d'orientation des courants, qui persiste après la décrue lorsque la rivière est retournée dans son lit mineur.

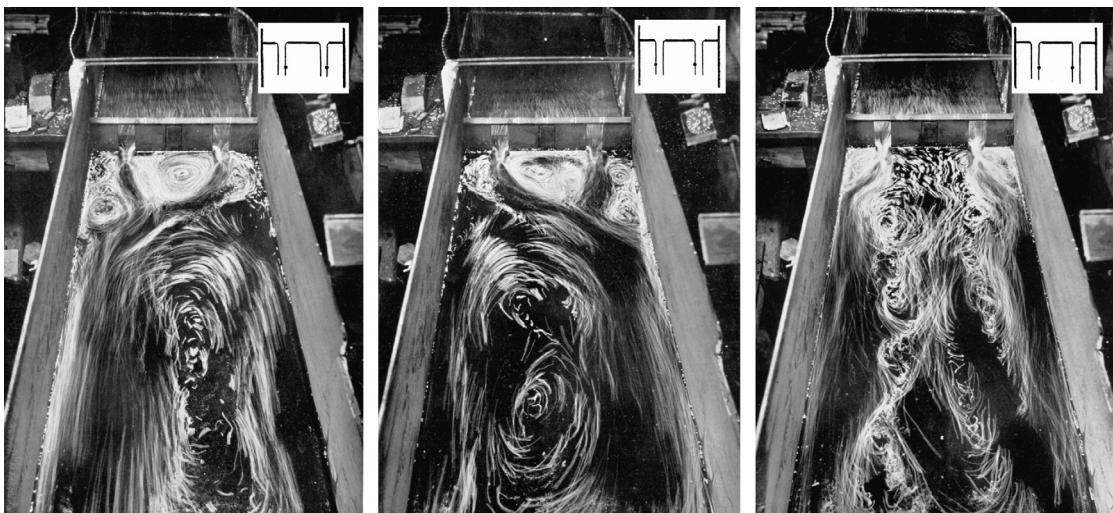


Fig. 21. Photographies d'écoulements correspondant aux schémas de la Fig. 20 ; ces écoulements peuvent être obtenus de diverses façons, notamment à l'aide de tiges disposées comme indiqué dans l'insert en haut à droite de chaque photographie [21,14].

3.4. Chronophotographie et cinématographie

3.4.1. Principe

Ses travaux sur les conduites amènent Camichel à s'intéresser à la mesure des vitesses dans les liquides. Le tube de Pitot est alors l'instrument classique pour de telles mesures. Mais cet instrument ne donne la vitesse qu'en un point ; de plus, il perturbe l'écoulement, sa résolution spatiale ne descend pas en-dessous de quelques millimètres, et l'inertie des manomètres ne permet pas l'étude de régimes transitoires rapides. Ces limitations vont conduire Camichel à développer une méthode fondée sur l'observation du déplacement de fines particules entraînées par l'écoulement : la chronophotographie. Dans sa première publication sur le sujet, en 1919, Camichel [22] décrit brièvement la méthode (avec des références à Scott Russell ainsi qu'à de Caligny, Boussinesq, et Étienne-Jules Marey), puis l'applique à divers écoulements. Dans l'article suivant [23], la méthode est plus détaillée :

«[La méthode chronophotographique] consiste à photographier des poussières [en suspension dans le fluide et] éclairées par un faisceau intermittent conformément au procédé de Marey. Ces poussières entraînent de petites bulles d'air ; les particules ainsi constituées subissent une sélection automatique : celles qui ont la même densité que le liquide ambiant restent en suspension dans celui-ci et servent aux mesures, les autres tombent au fond ou flottent à la surface. On obtient ainsi par réflexion sur les bulles d'air des points très brillants se détachant sur un fond noir. Ce dispositif a l'avantage de ne produire dans le liquide où l'on veut mesurer les vitesses aucune action perturbatrice ; il permet aussi de fixer avec précision les conditions initiales, par exemple de mettre le liquide en mouvement sans secousse et de réaliser les conditions spécifiées dans le théorème de Lagrange relatif à la dynamique des fluides parfaits.

Le schéma du montage est représenté dans la Fig. 22 ; en A se trouve un arc : on forme l'image du cratère de celui-ci sur la fente F, au voisinage de laquelle se trouve un disque D comprenant des secteurs alternativement pleins et vides. Ce disque est monté sur une transmission T mue par un moteur M, un compteur de tours C permet de déterminer la vitesse du disque. Une lentille L forme l'image de la fente F en coïncidence avec l'axe O de la chambre d'eau. On obtient ainsi un faisceau lumineux très délié qui éclaire vivement les particules situées dans la plan xy ; la photographie obtenue est agrandie suivant le cas dans le rapport de 1 à 3 ou de 1 à 5.»

Les premières expériences explorent diverses situations : l'écoulement d'eau entre deux glaces planes, le mouvement tournant accompagnant la vidange d'une chambre d'eau par un orifice à sa base, et l'écoulement sur un déversoir à surface libre [22]. Pour l'écoulement entre deux plans – distants de 2 cm –, «on peut ainsi étudier des points très rapprochés des parois, situés par exemple à 0,3 mm de celles-ci. La réflexion sur les glaces des trajectoires des particules permet de déterminer avec précision, sur les clichés, [la distance à la paroi]. On vérifie facilement que la courbe (u, y) est une parabole.»

Des expériences menées plus tard avec des colloïdes (solutions aqueuses de gélatine) montreront que l'écoulement plan de ces fluides à seuil «présentent une répartition des vitesses très différente de celle de la parabole classique [...] ; la courbe obtenue comporte une partie plate, dont la théorie explique l'existence» (Fig. 23) [24,25].

La Fig. 24 donne deux illustrations de la chronophotographie : l'écoulement dans un coude, et l'écoulement autour d'un disque à petit nombre de Reynolds. Pour ce dernier, l'éclairage continu (en retirant le disque denté) donne les lignes de courant.

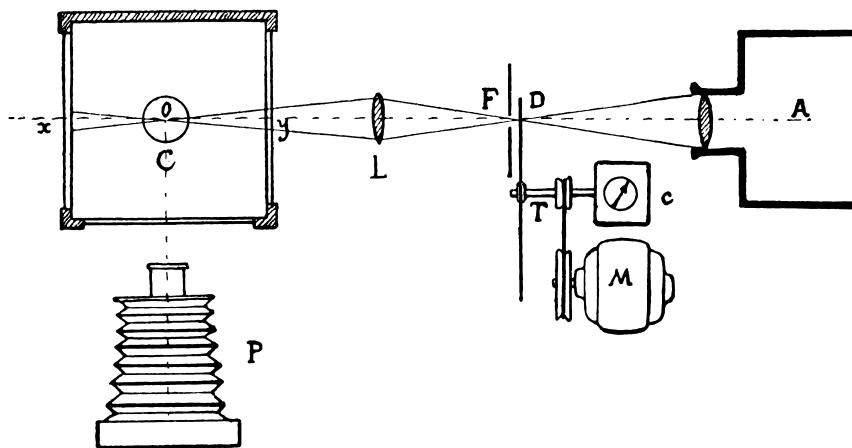


Fig. 22. Schéma du montage de la méthode chronophotographique [23].

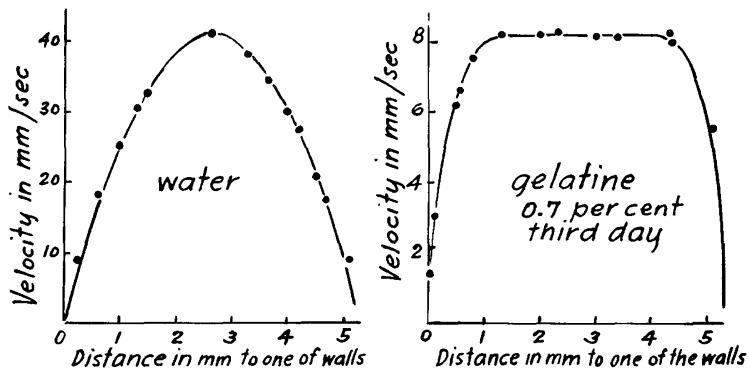


Fig. 23. Profil de vitesse entre deux plaques parallèles, pour l'eau et pour une solution de gélatine à 0.007% [24,25].

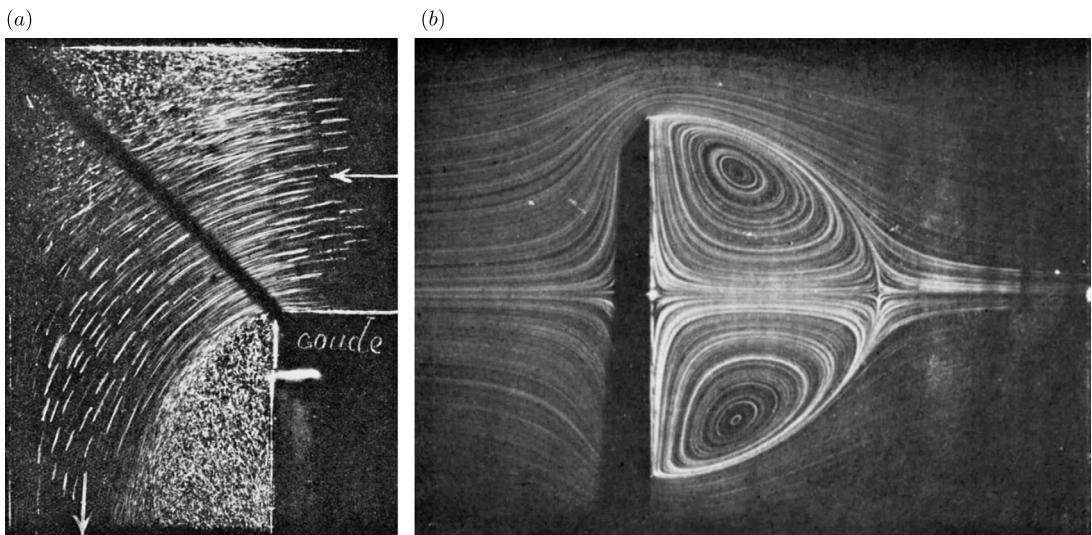


Fig. 24. Chronophotographie de l'écoulement dans un coude [13], et autour d'un disque à petit nombre de Reynolds [26].

3.4.2. Écoulements potentiels

Au-delà de la vitesse proprement dite, la chronophotographie permet de mesurer la circulation de la vitesse le long d'un contour, le vecteur tourbillon (moitié de la vorticité), et l'accélération. Elle est donc un outil d'analyse de la nature des écoulements, notamment de leur caractère irrotationnel ou non. Plusieurs procédés de détermination du vecteur tourbillon sont mis en œuvre : (i) par la détermination graphique des gradients de vitesse, (ii) par le dessin, sur la photographie, des

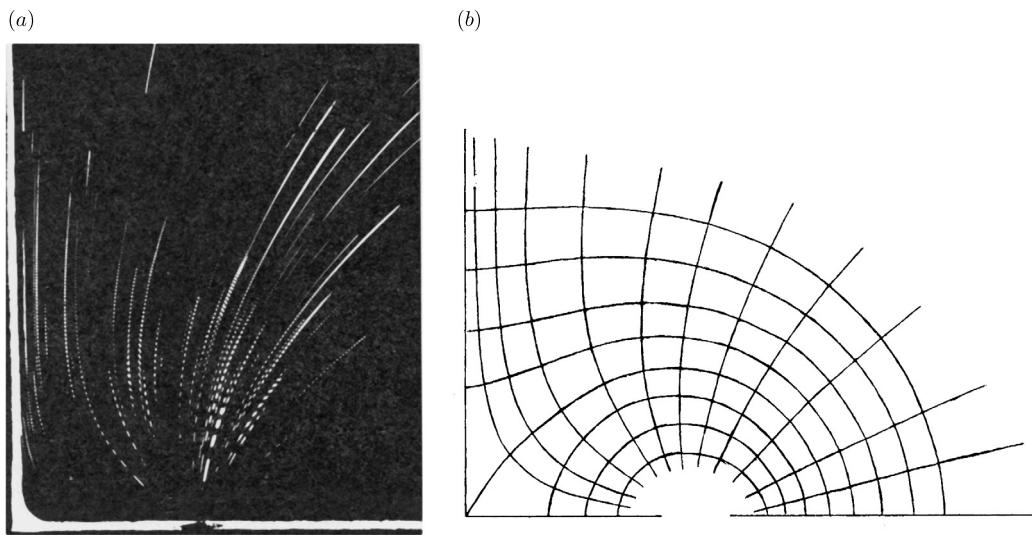


Fig. 25. (a) Chronophotographie de l'écoulement dans une chambre d'eau munie à sa partie inférieure d'un orifice en mince paroi de 1 cm de diamètre, avec une paroi latérale à 3 cm du centre de l'orifice. (b) Écoulement potentiel correspondant [23].

lignes de courant et des lignes qui leur sont orthogonales, (iii) par l'application du théorème de Stokes à un contour fermé (méthode la plus précise).

« Nous avons appliqué le procédé déduit du théorème de Stokes au déversement sur les barrages à seuil épais, à l'appel d'un ajutage dans une chambre d'eau, aux mouvements giratoires à axe vertical engendrés, dans d'autres cas, par l'écoulement par un orifice. »

Il est ainsi montré que le mouvement est potentiel dans la majeure partie des écoulements dans les chambres d'eau [27,28, 23], comme au-dessus des déversoirs [4,29]. Une autre application de la chronophotographie est la vérification expérimentale de la construction d'un écoulement potentiel par la méthode des images de lord Kelvin [30,23]. La Fig. 25 en donne une illustration.

3.4.3. Surfaces de discontinuité d'Helmholtz

« La résistance qu'un fluide très peu visqueux, très peu compressible, oppose au mouvement de translation permanent rapide d'un solide a été rattachée par Helmholtz (1868) à la production d'une surface de discontinuité de vitesse (mais non de pression), à l'arrière du solide ; cette surface sépare le liquide en mouvement par rapport au solide, d'une sorte de poupe liquide indéfinie, dans laquelle le liquide a le même mouvement de translation que le solide [...]. Des objections diverses ont été faites à cette conception d'Helmholtz. »

C'est ainsi que Marcel Brillouin (avec lequel Camichel a fait sa thèse) introduit, en 1911, un article important sur le sujet [58] prolongeant, entre autres, les travaux théoriques de Schwartz, Christoffel et Levi-Civita. Un enjeu majeur est la résolution du paradoxe de d'Alembert, selon lequel la traînée exercée sur un obstacle par un écoulement potentiel est nulle [56, §7.1.2]. C'est dans ce contexte que Camichel entreprend vers 1920 une série d'études expérimentales sur les conditions de décollement et la forme des surfaces de discontinuité, pour divers écoulements au travers d'ajutages ou autour d'obstacles [31–33].

« Pour certaines formes d'obstacles, par exemple un plan normal à la direction de l'écoulement, on peut comparer la forme de la surface de discontinuité observée à celle que donne le calcul par l'emploi de la représentation conforme. La concordance pour les premiers éléments sur un centimètre par exemple pour une plaque de 3×3 cm, est très satisfaisante. »

Au-delà d'une distance de l'ordre de la dimension de l'obstacle, « les tourbillons mélagent les deux zones et la surface de discontinuité perd sa netteté » [31]. La Fig. 26 montre la surface de discontinuité qui sépare, à l'aval d'une palette inclinée, l'écoulement potentiel extérieur et le sillage turbulent [33].

« La forme de la surface de discontinuité reste indépendante de la vitesse comme on a pu le vérifier pour des vitesses variant de 6,50 à 0,30 m/s. Quand la vitesse devient inférieure à 0,30 m/s, on a l'apparition, derrière l'obstacle, des tourbillons alternatifs décrits par MM. Brillouin, Bénard, Kármán, Joukowsky, etc. » [33]

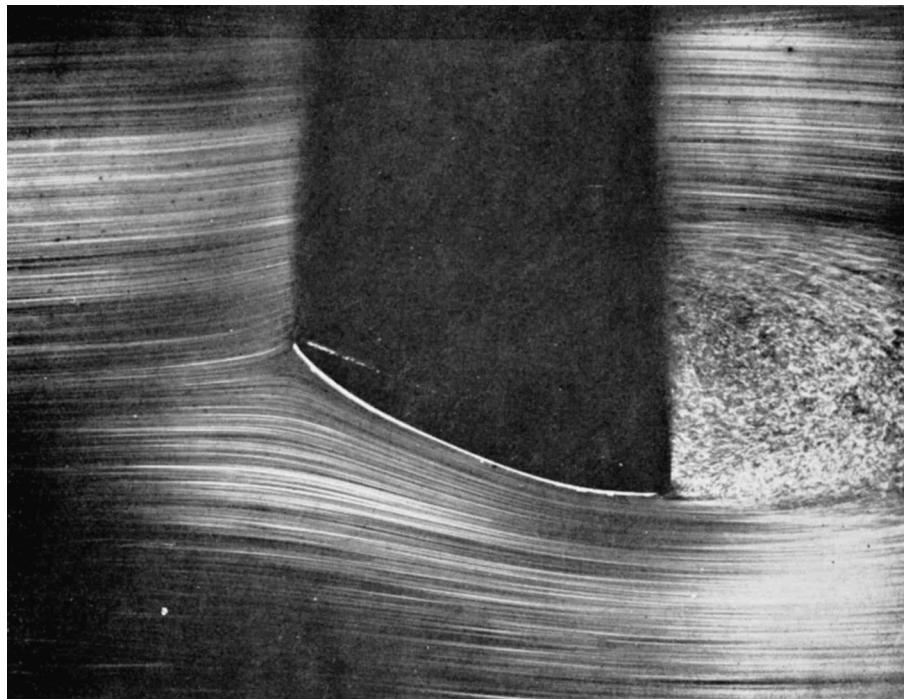


Fig. 26. Écoulement (de gauche à droite) autour d'une palette inclinée : une « surface de discontinuité » sépare l'écoulement potentiel extérieur du sillage turbulent [33].

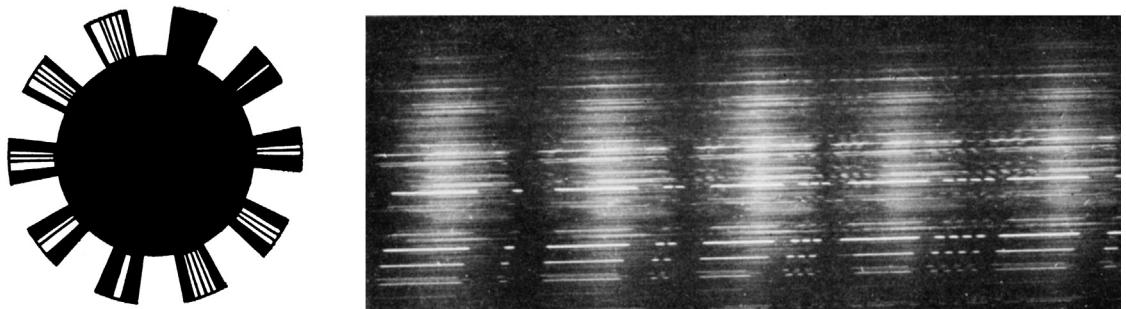


Fig. 27. Chronophotographie pour l'étude des phénomènes transitoires : disque « Morse » et exemple de cliché obtenu [19].

3.4.4. Régimes transitoires

Pour les phénomènes instationnaires (régimes transitoires, périodiques, ou turbulents), la méthode chronophotographique utilise, « pour produire l'éclairage intermittent, un disque portant des fentes constituant une sorte d'alphabet Morse qui s'inscrit dans le liquide et imprime sur chaque trait de la photographie, un pointillé qui permet d'en identifier les différents éléments à partir d'une origine du temps convenablement choisie sur le filet » (Fig. 27) [12, p. 24]. Certaines indéterminations se trouvent ainsi levées. Le dispositif sera utilisé notamment dans l'étude d'écoulements oscillants et de la dynamique d'établissement du sillage d'une plaque [34,35,19].

3.4.5. Mesures par fil chaud

« En utilisant un fil chaud faisant partie d'un pont de Wheatstone, MM. Dupin, E. Causse et J. Baubiac [36] ont mis au point une méthode d'inscription des tourbillons produits derrière un obstacle. Ils ont pu ainsi montrer que les tourbillons alternés de Bénard-Kármán présentaient parfois une régularité remarquable comme le montre [la Fig. 28]. » [13]. La méthode est décrite dans la thèse de Dupin [37], avec des références bibliographiques. Elle est également utilisée par Causse et Baubiac [35,19] pour la détermination de la période de phénomènes oscillants, notamment pour la période de « tourbillons secondaires » (tourbillons de Kelvin-Helmholtz) de l'ordre du centième de seconde [34] ; elle ne semble pas avoir été utilisée pour la mesure de vitesses (qui pose la question du calibrage).

D'autres techniques de mesure seront développées par le laboratoire d'hydraulique : visualisation par précipité chimique, amélioration du tube de Pitot pour la mesure de très petites différences de pression, mesure de forces par le petit déplace-

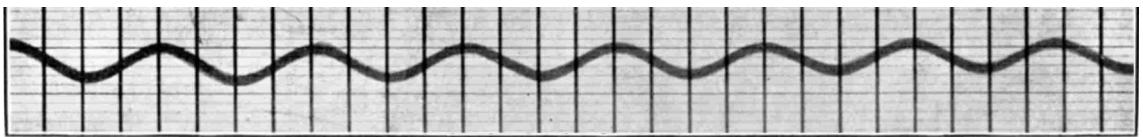


Fig. 28. Enregistrement par fil chaud des tourbillons alternés de Bénard-Kármán produits à l'aval d'un obstacle cylindrique de 5 mm de diamètre, placé dans un ajutage cylindrique de 30 cm de diamètre. Vitesse : 4 cm/s. [36].

ment des armatures d'un condensateur. Indiquons notamment la mesure de la distribution de pression autour de barreaux cylindriques, d'où seront déduits le « coefficient de résistance » et sa variation avec le nombre de Reynolds. Ces résultats « concordent avec les déterminations faites au laboratoire de Göttingen sur l'air » [25]. Certaines de ces techniques seront brièvement décrites dans les sections suivantes.

3.5. Tourbillons alternés de Bénard-Kármán

Les tourbillons, notamment ceux qui prennent naissance dans le sillage d'obstacles placés dans des écoulements, vont donner lieu à des recherches expérimentales très actives et fructueuses dans la décennie 1925 à 1936. La thèse de Pierre Dupin [37] leur est entièrement consacrée, ainsi que des parties importantes de celles de Max Teissié-Solier (écoulements à surface libre), Jean Baubiac (régimes transitoires), et Étienne Causse (vibrations de fils tendus, tourbillons secondaires) [38,19,35].

3.5.1. État de l'art

L'intérêt pour les tourbillons de sillage remonte à la question du son émis par une corde tendue placée dans un courant d'air, et aux harpes éoliennes qui exploitent le phénomène. Vincenc Strouhal établit, en 1878, que la fréquence du son dépend du diamètre D de la corde et de la vitesse V de l'air, et que la relation s'écrit, dans certaines limites, $f = 0,185 V/D$. Rayleigh, en 1896, met ce son en relation avec l'instabilité d'une « surface de discontinuité » dans le sillage de la corde, et propose une correction de la loi de Strouhal faisant intervenir la viscosité (pour rendre compte du fait que, selon Strouhal, la hauteur du son dépend de la température) :

$$\frac{fD}{V} = 0,195 \left(1 - 20,1 \frac{\nu}{VD} \right) \quad (2)$$

Henri Bénard, de son côté, entreprend à partir de 1904 de minutieuses études des tourbillons dans les liquides, engendrés dans le sillage de divers obstacles [59]. Theodore von Kármán, à Göttingen, pose d'un point de vue théorique la question de la distance entre deux tourbillons consécutifs (1912), et établit une condition géométrique de stabilité de l'écoulement potentiel associé à une double allée de tourbillons alternés.

Les résultats de Rayleigh, Bénard et von Kármán laissent toutefois plusieurs points dans l'obscurité. D'une part, la théorie de von Kármán n'est pas bien vérifiée expérimentalement, tant pour la géométrie de la double allée tourbillonnaire que pour l'hypothèse d'un nombre de Strouhal fD/V constant. Par ailleurs, les fréquences mesurées par Bénard, et par E.G. Richardson, ne vérifient pas la similitude de Reynolds, contrairement à ce qu'on attend de l'argumentaire – correct – de Rayleigh. Enfin, la question d'un seuil d'apparition des tourbillons reste entière. Les deux thèses de Dupin et Teissié-Solier vont apporter des réponses décisives à ces questions, réponses qui demeurent des références.

3.5.2. Montage expérimental

Des tiges de section circulaire sont placées dans un ajutage de 30 cm de diamètre, alimenté à partir d'un bassin par l'intermédiaire d'une tubulure convergente. La tubulure réalise alors un écoulement laminaire de vitesse uniforme dans l'ajutage, sauf au voisinage immédiat des parois. Le montage optique pour la chronophotographie est semblable à celui représenté sur la Fig. 22. Les conditions expérimentales sont soigneusement contrôlées, notamment la température qui est mesurée avec une précision meilleure que le dixième de degré afin de tenir compte de son effet sur la viscosité.

La période des tourbillons est mesurée de différentes façons : par observation directe pour les périodes supérieures à 1/3 de seconde environ, par la « méthode du fil » (stroboscopie d'un fil ondulant dans le sillage), ou par la « méthode des franges » :

« Les particules d'aluminium servant à rendre visibles les mouvements du fluide sont des lames minces, constituant de petits miroirs qui, éclairés par un faisceau de rayons parallèles, paraissent brillants lorsque leur normale est la bissectrice de l'angle des rayons incidents et de la direction joignant la particule à l'œil de l'observateur. Donc, chaque fois que les particules, dans leur mouvement, redeviennent parallèles à une même direction de plan, elles redeviennent brillantes. On obtient ainsi des franges lumineuses que l'on observe par stroboscopie. » [16].

À partir de 1930, se développera la mesure par fil chaud, comme indiqué plus haut.

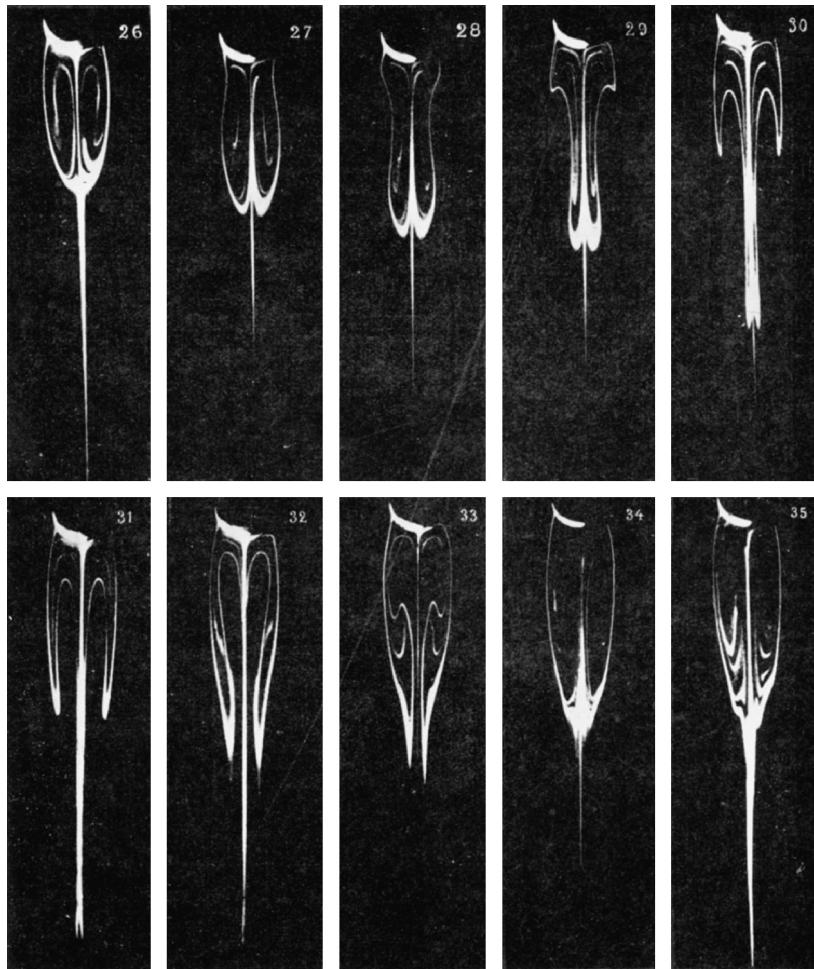


Fig. 29. Évolution du sillage pendant le transitoire de naissance du « régime turbulent » (photographies extraites d'un film) [39,37].

3.5.3. Sillage stationnaire et apparition des tourbillons alternés

À petit nombre de Reynolds, l'écoulement est symétrique entre l'amont et l'aval de l'obstacle. Pour des valeurs supérieures, « on voit apparaître derrière l'obstacle un sillage dont la section par un plan méridien met en évidence deux courbes [les séparatrices] présentant des points singuliers que j'ai appelés α , β . » [12]. La longueur de ce sillage vérifie les lois de la similitude. Les expériences montrent qu'il est nécessaire, « pour pouvoir assimiler le cylindre à un obstacle de longueur infinie », de lui donner une longueur L telle que $L/D \geq 25$.

L'apparition des tourbillons est décrite par Dupin [37] comme suit.

« Pour permettre une bonne observation, nous avons utilisé un précipité blanc impalpable ne possédant aucune vitesse initiale et ne pouvant de ce fait troubler l'écoulement. En régime de Poiseuille ce précipité habille les courbes $\alpha\beta$ [qui définissent la région de recirculation] et l'aspect du sillage est celui représenté par la [Fig. 29], photo 26. Une ouverture de la vanne provoque une variation brusque de vitesse et donne naissance à deux tourbillons symétriques, en phase, qui viennent écraser les courbes $\alpha\beta$ comme le montrent les [photos] 27 et 28.

Importés par le fluide, ces tourbillons s'éloignent en entraînant avec eux une partie du précipité (photos 29 et 30 de la Fig. 29). Une nouvelle quantité de précipité provenant de l'obstacle dessine à nouveau le sillage correspondant à la nouvelle vitesse du fluide (photos 30 à 33). Chaque ouverture de vanne reproduit les mêmes phénomènes. Cependant, si la vitesse dépasse légèrement la valeur critique correspondant au changement de régime, l'aspect du sillage se modifie progressivement et l'on assiste alors à la naissance du régime turbulent. Tout d'abord, les courbes $\alpha\beta$ se déforment légèrement vers leur extrémité aval, de petites encoches apparaissent décalées sur chaque face (photos 34 et 35). Bientôt ces encoches, à peine visibles au début, s'accusent nettement (photos 36 et 37 de la Fig. 30). La queue centrale, jusqu'alors rectiligne, commence à prendre un aspect sinueux (photo 38). Les courbes $\alpha\beta$ se déforment, et le mouvement d'oscillation de l'ensemble augmente d'amplitude jusqu'à atteindre une valeur limite (photos 39 à 45). La période transitoire est alors terminée. »

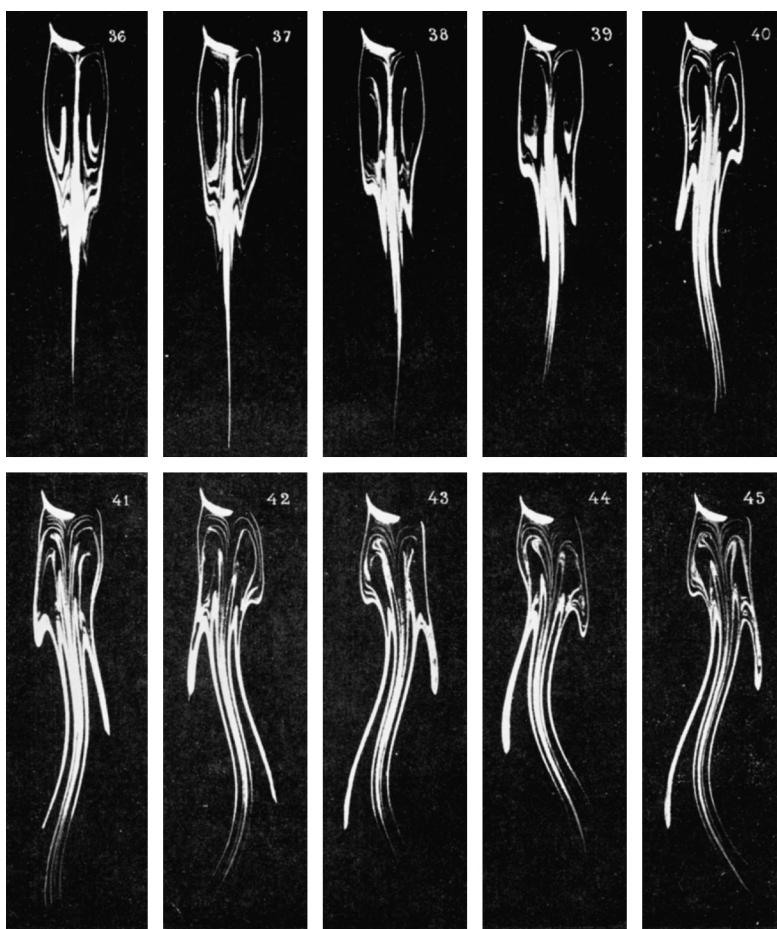


Fig. 30. Suite de la Fig. 29 [39,37].

3.5.4. Vérification des lois de similitude pour les tourbillons alternés

«[Si la loi de similitude dynamique s'applique,] le nombre $S = D/VT$, dénommé par M. Henri Bénard paramètre de Strouhal, doit conserver une valeur unique quels que soient le diamètre de l'obstacle et la viscosité du liquide pour un nombre de Reynolds $VD/(\mu/\rho)$ déterminé. Cette condition est vérifiée par nos résultats expérimentaux, comme on peut s'en rendre compte par la courbe [Fig. 31], que nous désignerons sous le nom de courbe de Strouhal. (Mais il est bien entendu que Strouhal, qui n'a étudié, en 1878, que la hauteur apparente des sons musicaux rendus par un bâton déplacé rapidement dans l'air, ne s'est pas occupé du principe de similitude non plus que des tourbillons alternés qu'il ignorait.) Par suite, la loi de similitude dynamique s'applique bien au phénomène des tourbillons alternés.

La méthode du fil, précédemment décrite, nous a permis de prolonger la courbe de Strouhal jusqu'à un nombre de Reynolds voisin de 20000, [où] le paramètre de Strouhal S conserve une valeur sensiblement constante et voisine de 0,200. [...] La théorie de Kármán [qui conclut à un paramètre de Strouhal constant] se trouve donc être en défaut pour la première portion de la courbe de Strouhal.» [37, p. 29].

D'autres expériences sont réalisées en plaçant le cylindre à l'extrémité aval d'une conduite de 30 cm de diamètre, à plus de 50 diamètres de l'entrée : l'écoulement de l'eau est alors pleinement turbulent. «Les mesures dans ce régime sont beaucoup moins précises qu'en régime non turbulent, mais tous les points se disposent bien autour d'une courbe moyenne qui est celle du régime non turbulent.» [40]

3.5.5. Tourbillons alternés avec surface libre

Les résultats précédents, obtenus pour un écoulement en charge, sont complétés par Teissié-Solier par des expériences dans une cuve à surface libre, où l'obstacle est tracté à vitesse uniforme [38,41]. Il apparaît que, pour un cylindre de section circulaire, la fréquence des tourbillons s'aligne sur la courbe de Strouhal des écoulements en charge [41]. Des obstacles de section variée (carrée, rectangulaire, triangulaire, ou en lame de couteau) sont aussi étudiés, pour des nombres de Reynolds allant jusqu'à 23000. Au-delà de $R \approx 1000$, il apparaît que le nombre de Strouhal est bien constant pour des obstacles géométriquement semblables, la constante variant de 0,13 à 0,26 selon la forme de la section [41]. Ces derniers

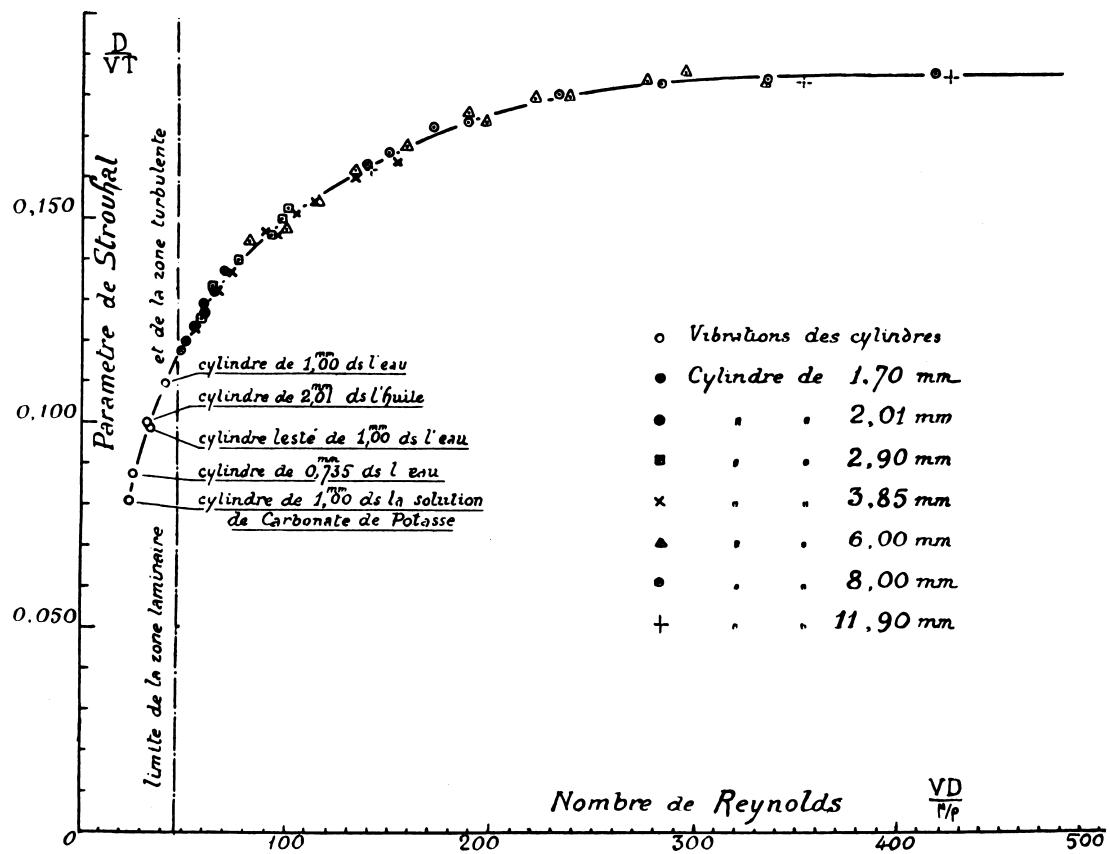


Fig. 31. Période des tourbillons de Bénard-Kármán : nombre de Strouhal fonction du nombre de Reynolds [39].

résultats permettent notamment d'interpréter la dispersion des résultats de Bénard, qui ne vérifiaient pas la similitude : ils ne correspondaient pas à des obstacles géométriquement semblables.

3.5.6. Prolongement de la courbe en-dessous du seuil

La Fig. 31 montre des points en-dessous du critérium $R_c \approx 47$, alignés sur la courbe de Strouhal. Ces points, obtenus avec des tiges de faible diamètre, correspondent à l'observation que, pour une certaine valeur de la vitesse de l'écoulement, «la tige cylindrique encastrée formant obstacle se met à vibrer, dans un plan perpendiculaire à la direction générale de l'écoulement. Rayleigh, Riabouchinsky et Richardson avaient observé cette vibration et émis l'hypothèse qu'elle était due à la résonance de la période propre de la tige, sous l'influence des tourbillons alternatifs qu'elle provoque.» [42].

Dupin [37] précise ses observations :

«[Augmentant la vitesse par petits incrémenta,] on voit la tige se mettre à osciller pour une vitesse V_1 bien définie. L'aspect du sillage, qui jusqu'alors était resté celui caractéristique du régime laminaire, présente immédiatement l'aspect caractéristique du régime turbulent [i.e. non stationnaire]. L'amplitude de l'oscillation croît avec la vitesse, passe par un maximum pour une vitesse V_2 d'ailleurs assez voisine de V_1 puis diminue et s'annule. Si l'on examine à nouveau avec attention le sillage, on peut constater qu'il est redevenu non turbulent, aspect qu'il conserve d'ailleurs jusqu'au moment où la vitesse critique définie par la relation $V_c = 47v/D$ est atteinte. [...]»

Si l'on reporte [le point correspondant à la période de la tige à la résonance] sur la courbe de Strouhal, on constate que ce point se place dans la zone laminaire sur le prolongement même de la courbe déterminée par la mesure directe des tourbillons. Nous avons renouvelé l'expérience avec diverses tiges et des liquides de viscosités bien supérieures à celle de l'eau.»

Teissié-Solier reprend l'étude en perturbant le sillage «par un choc sur l'obstacle, la rencontre du sillage avec un tourbillon provoqué latéralement, ou bien une diminution brusque du nombre de Reynolds.»

«La perturbation ainsi créée ayant disparu, [...] la queue visible à l'aval des courbes $\alpha\beta$ se met à osciller, des encoches se détachent périodiquement de part et d'autre de l'obstacle (Fig. 32). Le sillage présente alors durant quelques secondes

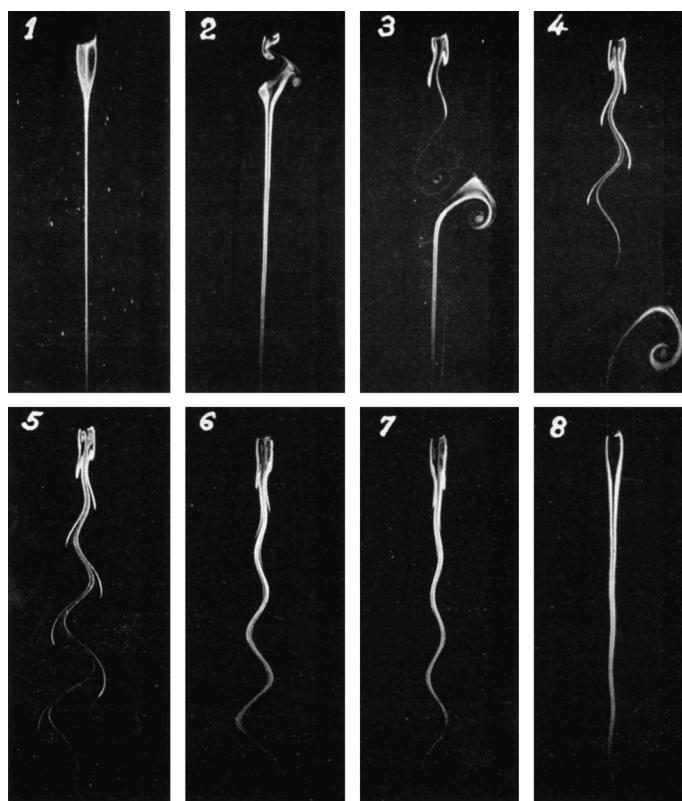


Fig. 32. Transitoire de naissance et de disparition d'une allée de tourbillons dans le sillage d'un cylindre de diamètre 6,95 mm, en deçà du critérium [43,14].

l'aspect caractéristique que lui donne la présence de tourbillons alternés à l'aval de l'obstacle. Puis peu à peu l'oscillation constatée s'amortit, [...] et le sillage reprend l'aspect qu'il avait avant le passage de la perturbation.

Nous avons obtenu le même phénomène en réglant la vitesse du liquide à une valeur correspondant à un nombre de Reynolds supérieur au critérium et en effectuant une fermeture partielle de très courte durée aboutissant à un nombre de Reynolds inférieur au critérium.»

«On peut d'ailleurs rendre le phénomène permanent par une méthode de résonance (Fig. 33), en disposant sur la paroi de la conduite, à hauteur de l'obstacle, un robinet tournant analogue à celui utilisé par l'un de nous avec MM. Eydoux et Gariel dans des recherches sur les coups de bâlier. Lorsque la vitesse de rotation de ce robinet est telle que la fréquence de ses ouvertures correspond à celle du phénomène périodique, ce dernier se maintient en permanence ; nous avons pu atteindre ainsi un nombre de Reynolds égal à 10.» [43]

Ces expériences peuvent être interprétées à la lumière des théories de Reynolds sur la turbulence. En dessous du critérium, «la viscosité empêche les perturbations inévitables de l'écoulement, de donner naissance aux tourbillons ; [cependant] au moment de la vibration, la résonance de la tige intervient comme élément amplificateur pour permettre l'existence des tourbillons, malgré la viscosité. [...] Au-dessus du critérium, au contraire, les perturbations, du fait de la diminution relative du terme d'amortissement due à la viscosité, se trouvent amplifiées, se propagent dans la masse liquide et rendent le régime turbulent.»

3.5.7. Durée d'établissement du «régime turbulent»

Lorsqu'on augmente la vitesse d'écoulement au-delà du seuil, l'établissement des tourbillons alternés n'est pas instantané (Fig. 34). L'amplitude des oscillations s'amplifie exponentiellement dans les premiers instants, puis tend vers une valeur constante, conformément à l'équation de van der Pol (1927) à laquelle Camichel fait référence. L'annulation du décrément logarithmique permet une détermination précise du critérium [44].

Dans sa thèse, Baubiac [19] entreprend une étude systématique de ces temps d'établissement. Le mode opératoire consiste à réaliser, à partir d'une vitesse légèrement inférieure au seuil, des incrément brusques de vitesse, et à mesurer le temps de relaxation vers le régime établi où l'amplitude atteint sa valeur maximale. L'imprécision théorique de ce «temps» est discutée : il faudrait en effet plutôt déterminer la durée pour atteindre une fraction définie (disons 95 %) de l'amplitude maximale, ainsi que le fait Crausse [35]. Les résultats sont présentés sur la Fig. 35.

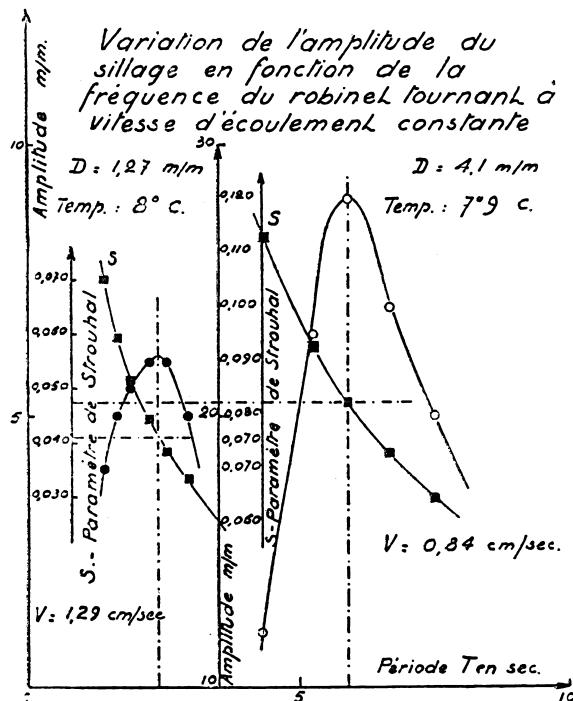


Fig. 33. Résonance de la vibration de la tige avec les tourbillons alternés forcés par un robinet tournant, en deçà du critérium; $Re = 11.9$ et 24.4 [14].

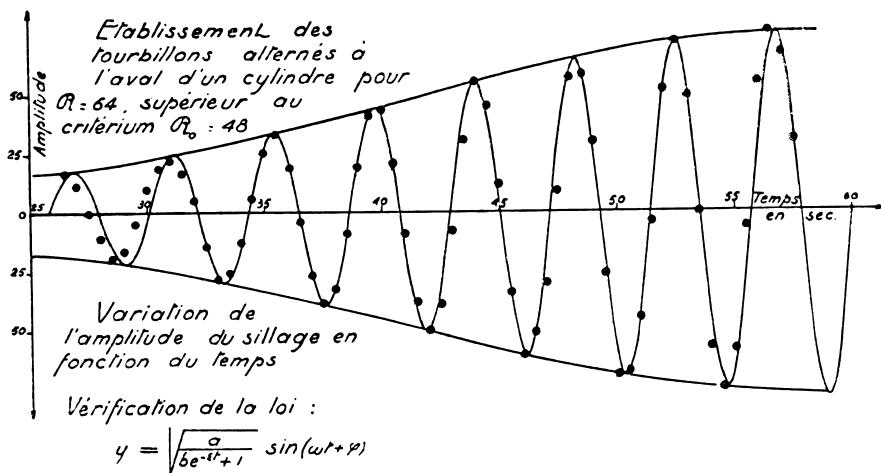


Fig. 34. Établissement des tourbillons alternés au-dessus du critérium [14].

«[Le temps d'établissement] est indépendant du nombre de Reynolds initial et ne dépend que du nombre de Reynolds final, [et il] est d'autant plus grand que le nombre de Reynolds atteint est plus voisin du critérium. [Ainsi,] de même que pour le phénomène d'apparition du régime turbulent en conduite, [...] nous pouvons émettre l'hypothèse suivante : la courbe [...] se prolonge jusqu'à l'infini asymptotiquement à l'axe figurant le critérium des tourbillons alternés.»

Une nouvelle définition du critérium peut alors être donnée :

«Le critérium des tourbillons alternés, est le nombre de Reynolds final pour lequel, au cours d'un régime transitoire spécifique, le régime permanent des tourbillons alternés, s'établit à l'aval de l'obstacle *au bout d'un temps infini*.» [19].

D'autres expériences montrent que lorsque le critérium est traversé par vitesse décroissante, l'extinction des tourbillons «est représentée par une portion de courbe sensiblement symétrique de celle déjà tracée sur cette figure, par rapport à

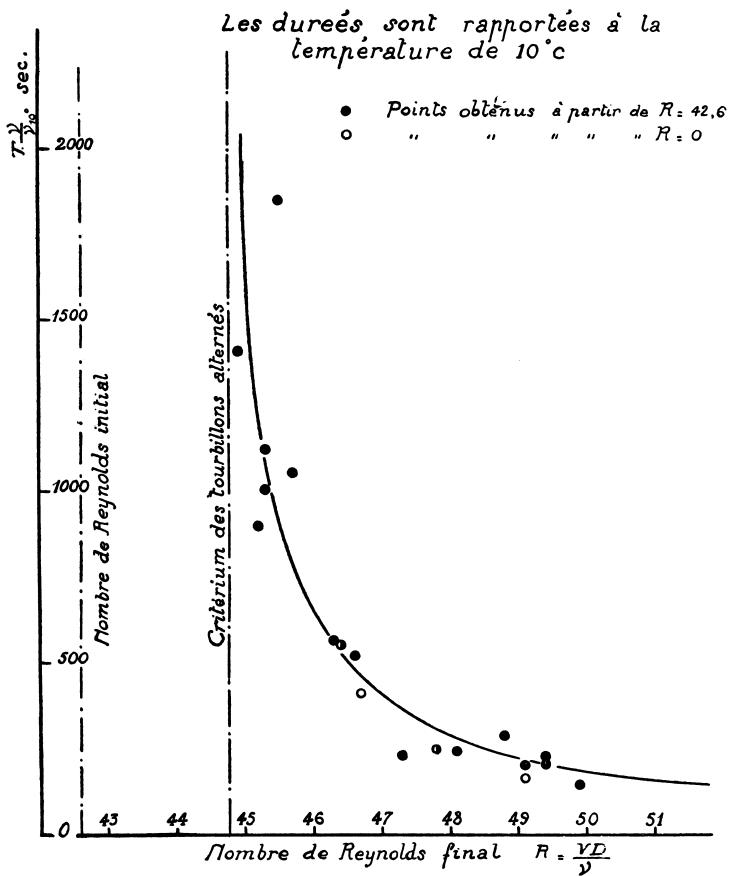


Fig. 35. Durée d'établissement du régime permanent des tourbillons alternés en fonction du nombre de Reynolds, pour un cylindre de 0,58 cm de diamètre [19].

l'axe représentant le critérium des tourbillons alternés. [Une autre définition du critérium s'en déduit], correspondant à la disparition des tourbillons au bout d'un temps *infini*.»

3.5.8. Vibrations de tiges encastrées

«Plusieurs auteurs, parmi lesquels Riabouchinsky, lord Rayleigh, E.G. Richardson, ont constaté que lorsque la vitesse relative du fluide et du corps immergé est telle que la période des tourbillons se trouve être voisine de la période propre de ce corps, ce dernier se met à osciller *dans un plan perpendiculaire à la direction de cette vitesse*. [...]»

Nous avons nous-mêmes entrepris l'étude de la vibration de tiges cylindriques, encastrées à leur base et libres à leur extrémité supérieure, sous l'influence des tourbillons alternés de Bénard.» [37,40].

La période d'oscillation des cylindres est mesurée par stroboscopie, tandis que celle des tourbillons est mesurée par la méthode du fil, «fixé non sur le cylindre mais sur un fil très fin tendu horizontalement dans la conduite».

«Le phénomène a une allure identique pour les trois cylindres (Fig. 36). À partir d'une vitesse V_0 , fonction du diamètre du cylindre, l'obstacle se met à osciller; l'amplitude est très faible [...] et la période T_0 égale à celle de ses oscillations libres [dans de l'eau au repos]. La période des tourbillons est sensiblement égale à celle qu'auraient ces tourbillons pour la vitesse V_0 si l'obstacle ne vibrât pas, $T = D/0,2 V$.

[Au-delà d'une vitesse V_1], le phénomène change d'aspect. [L'amplitude des oscillations de la tige présente] des battements plus ou moins réguliers. Avec le stroboscope, il est impossible d'obtenir l'immobilité de la tige et par suite de mesurer sa période. Le fil permet au contraire de mesurer celle des tourbillons, [...] légèrement plus longue.

Pour une vitesse V_2 supérieure à V_1 , la tige oscille de façon plus régulière. *Le fil et la tige ont maintenant même période. Il y a eu accrochage.* Mais il est à remarquer que la période commune est supérieure à la période initiale T_0 de la tige. [Au-delà de V_2 , la période commune décroît.] Pour une vitesse V_3 la période du système cylindre-tourbillon redevient égale à la période initiale T_0 du cylindre. L'amplitude de la tige qui avait augmenté progressivement atteint son maximum. Il faut dépasser une vitesse V_4 pour constater que la stroboscopie du fil devient à son tour impossible,

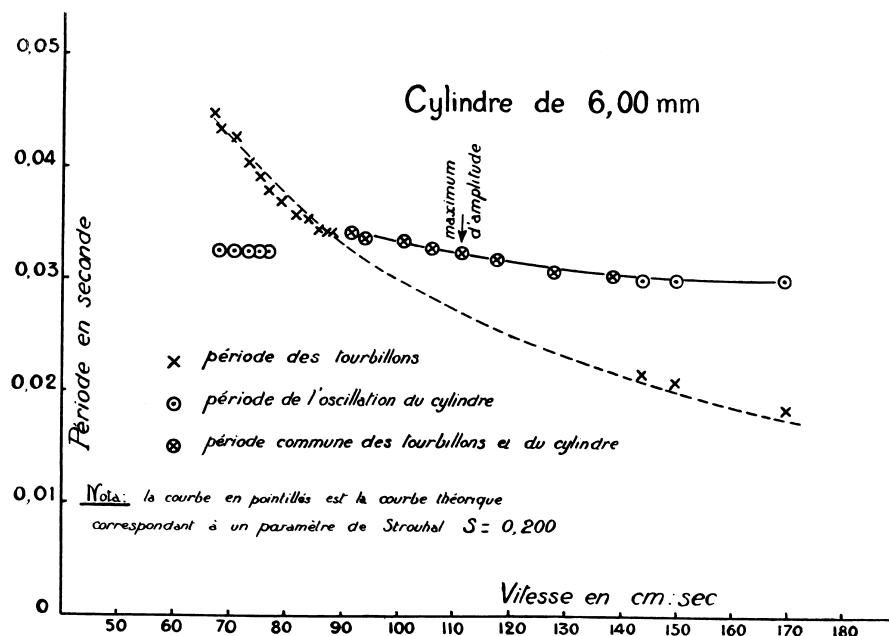


Fig. 36. Périodes des tourbillons et des oscillations de l'obstacle, pour un cylindre de 6 mm [45].

tandis que celle de la tige se maintient toujours très nette, bien qu'à partir de la vitesse V_3 on observe par moments des battements très accusés.

Pour une vitesse V_5 supérieure à V_4 , le fil et la tige ont à nouveau, comme au début du phénomène, des périodes différentes. La période de la tige diminue toujours, mais très lentement, tandis que la période du fil, c'est-à-dire celle des tourbillons, redevient voisine de $T = D/0,2V$. Enfin, pour une vitesse V_6 , la tige cesse d'osciller.»

À vitesse décroissante, la même séquence de phénomènes est observée en sens inverse, mais avec une hystérésis.

«Cette étude apporte une contribution intéressante au problème si complexe et si mal connu des vibrations des ouvrages hydrauliques. Elle donne, pour les centrales hydro-électriques, les valeurs des vitesses produisant la vibration des grilles et, en conséquence, elle permet la détermination des dimensions des barreaux de celles-ci. C'est ce qui a été fait pour le barrage de la Sélune dans la Manche.» [13].

Le mode de vibration transversal n'est pas le seul possible : Dupin découvre un mode de vibration *dans un plan parallèle à la direction de l'écoulement*, bien visible pour des cylindres de diamètre supérieur à 4 mm [37,46]. Ces vibrations longitudinales apparaissent à faible vitesse d'écoulement, lorsque cette vitesse augmentant lentement, la période (décroissante) des tourbillons alternés atteint le double de la période propre de la tige. À vitesse plus grande, ces vibrations s'éteignent et les vibrations transversales décrites plus haut apparaissent. [35].

3.5.9. Vibrations de fils tendus

Un prolongement de l'étude des vibrations de tiges semi-encastrées est celle des vibrations de fils tendus dans un écoulement. Il s'agit, pour Causse [35], «de chercher à préciser, en particulier, la relation existant entre la fréquence de vibration du fil et celle des tourbillons alternés qui, par leur action périodique, entretiennent cette vibration, [...] aussi bien pour la vibration en fondamental que lors de l'apparition des divers harmoniques.» Les applications concernent, par exemple, les oscillations de lignes électriques aériennes.

La vitesse du fluide croissant par paliers, la vibration du fil dans une direction transverse à l'écoulement apparaît pour une vitesse V_1 (Fig. 37) et persiste jusqu'à une vitesse V_2 . Sur toute la gamme de vitesses, fil et sillage ont même période : «fil et sillage sont, en quelque sorte, accrochés.» Leur période commune diminue graduellement au fur et à mesure que croît la vitesse, tout en restant supérieure à celle qu'auraient les tourbillons en l'absence de vibrations du fil (et correspondant à $S = 0,2$). L'amplitude de la vibration, du l'ordre du millimètre, passe par un maximum peu accusé, qui correspond à une période de vibration du fil égale à sa période propre. «Dès que la valeur V_2 est atteinte, la vibration du fil cessant, la période d'oscillation du sillage diminue brusquement.» La vitesse décroissant, la même séquence de phénomènes se déroule dans l'autre sens, avec une hystérésis semblable à celui constaté pour les tiges vibrantes. Pendant la vibration, le fil a l'aspect d'un fuseau présentant un ventre à mi-hauteur.

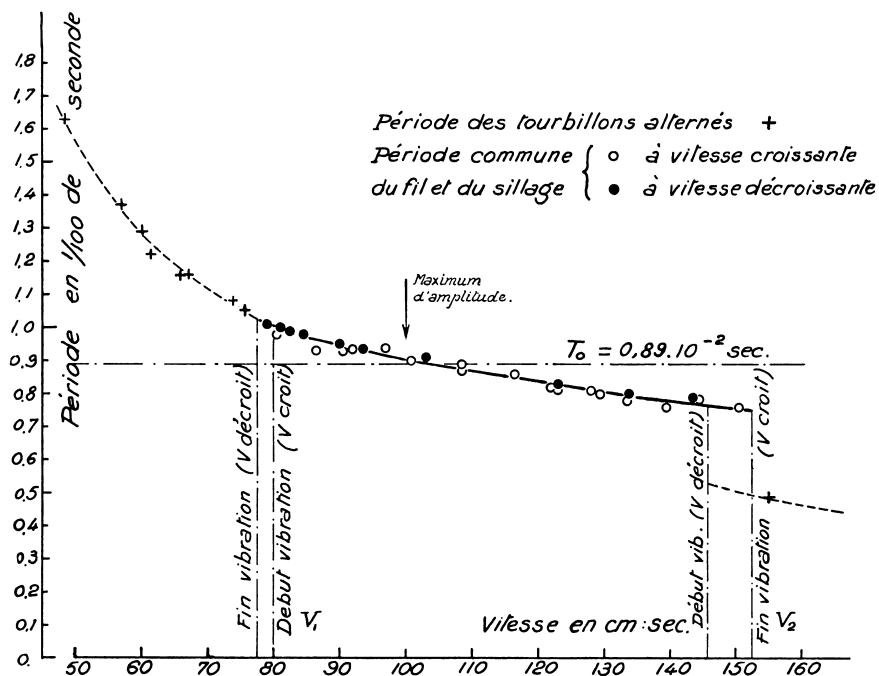


Fig. 37. Vibration en fondamental d'un fil tendu dans l'eau en mouvement ; $D = 0,15$ cm, eau à 9°C , période propre du fil : $T_0 = 8,9$ ms [35].

Avec des fils fins, on observe non seulement le mode fondamental mais également la vibration d'harmoniques, «leur apparition s'accompagnant généralement de la production d'un son dont l'intensité est suffisamment élevée pour que l'audition en soit possible à distance.»

3.6. Tourbillons secondaires

3.6.1. Description du phénomène

Dans le fil des études précédentes sur les surfaces de discontinuité d'Helmholtz et les tourbillons de Bénard-Kármán, Crausse entreprend l'étude des «tourbillons secondaires», ainsi définis [35] :

«Nous appellerons *tourbillons secondaires* les tourbillons qui se produisent, dans certaines conditions, sur le *bord du sillage* d'un obstacle, à partir de cet obstacle, lorsque celui-ci est immergé dans un fluide en mouvement relatif. [...] Il est certain que l'on aurait pu choisir un qualificatif plus judicieux, d'autant plus que ces tourbillons sont susceptibles de se produire même lorsque le phénomène alterné ne se manifeste pas, comme, par exemple, à l'aval d'un demi-plan infini. Nous avons malgré tout conservé [cette désignation] en raison de sa concision.»

Ces tourbillons sont étudiés pour différents obstacles, notamment un barreau cylindrique, et un obstacle plan normal à l'écoulement. Nous limitons ici la présentation à cette dernière situation, schématisée sur les Figs. 38a et 41, où une plaque obture la moitié de la section droite d'une conduite de 30 cm de diamètre. Le sillage est visualisé par un colorant émis dans le sillage juste à l'aval de l'obstacle. Crausse [35] décrit ainsi ses observations :

«Lorsque la vitesse est relativement faible, la ligne marquant la frontière du sillage, qui s'appuie sur le demi-plan au point de décollement, ne présente pas de singularité, tout au moins au voisinage de l'obstacle (Fig. 38b). Pour une vitesse un peu supérieure, on constate la présence d'ondulations qui apparaissent au voisinage de l'obstacle et s'éloignent progressivement de lui (Fig. 38c). Pour une vitesse encore plus grande, ces ondulations prennent la forme d'encoches dont l'allure se précise au fur et à mesure qu'elles s'éloignent (Fig. 38d). Enfin, lorsque la vitesse a une valeur suffisamment élevée, les encoches s'enroulent sur elles-mêmes jusqu'à présenter la forme caractéristique des tourbillons, l'enroulement étant d'autant plus prononcé que les tourbillons, pour une vitesse donnée, sont âgés (Fig. 38e). [...]»

Lorsque la vitesse est relativement grande, [certains tourbillons se résorbent peu après leur apparition], ou sont englobés par un tourbillon adjacent (Fig. 39), de sorte que ceux qui subsistent sont moins nombreux et ont, par conséquent, une fréquence moyenne plus faible que celle des tourbillons initialement formés.»

Des observations semblables sont faites pour des écoulements à surface libre, les tourbillons se manifestant alors par de petites dépressions de la surface.

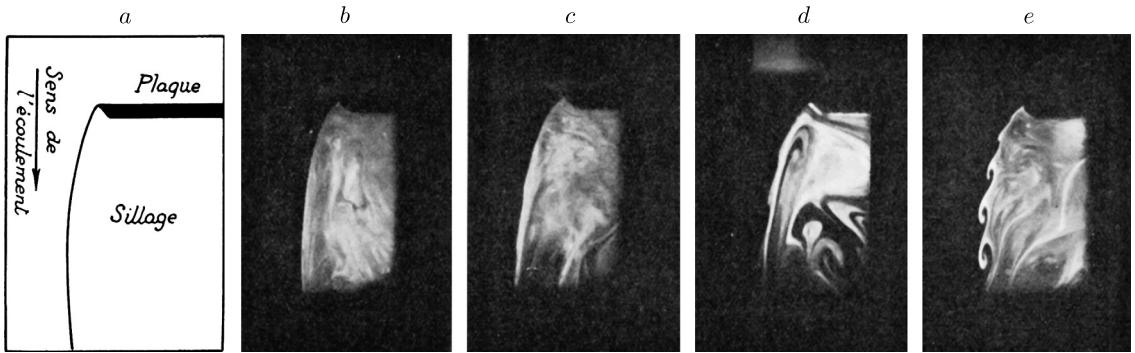


Fig. 38. Surface de discontinuité bordant le sillage d'une plaque, et photographies des tourbillons secondaires qui s'y développent au-delà d'une certaine vitesse [35, p. 71] [47].

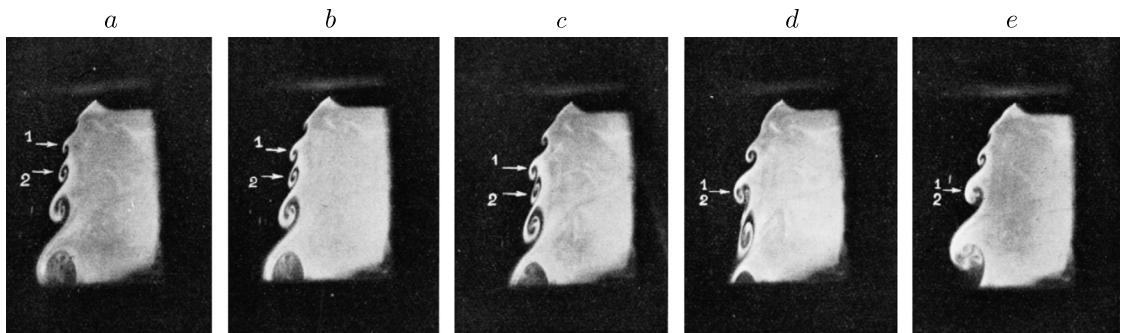


Fig. 39. Disparition d'un tourbillon secondaire (2) englobé par le tourbillon (1) qui le suit [35, p. 73].

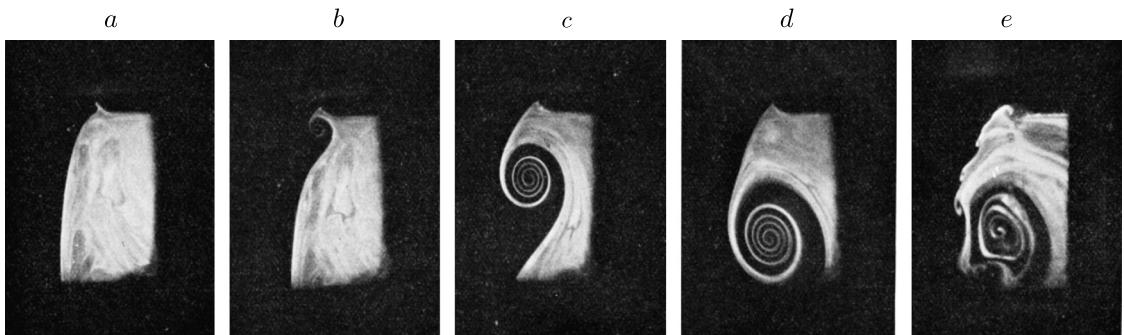


Fig. 40. Stades successifs de formation d'un tourbillon du régime transitoire à l'aval du demi-plan, et interactions de ce tourbillon avec les tourbillons secondaires [35, p. 75] [47].

3.6.2. Interaction avec un tourbillon du régime transitoire

Lors d'une augmentation brusque de la vitesse, un tourbillon de régime transitoire apparaît, grossit et se transporte vers l'aval comme illustré par la Fig. 40a-d. Lorsque la vitesse atteinte est suffisamment grande, des tourbillons secondaires se développent sur le tourbillon du régime transitoire (Fig. 40e).

3.6.3. Similitude

La période des tourbillons secondaires est mesurée de diverses façons : par fil chaud le plus fréquemment, ou par comptage visuel, par une méthode photographique, ou à l'aide d'un stroboscope. La Fig. 41 montre la variation de cette période avec la vitesse. Le phénomène ne faisant pas intervenir d'échelle de longueur propre (les tourbillons étant de taille millimétrique, le diamètre de la conduite est supposé ne pas intervenir), la similitude de Reynolds impose que la période doit varier selon la loi

$$V \sqrt{T/\nu} = \text{Cte}$$

Cette prédiction se trouve bien vérifiée pour une viscosité donnée (Fig. 41). Des écarts apparaissent toutefois pour les périodes inférieures à 0,1 s, attribués à des appariements de tourbillons qui se produisent de plus en plus près de l'obstacle.

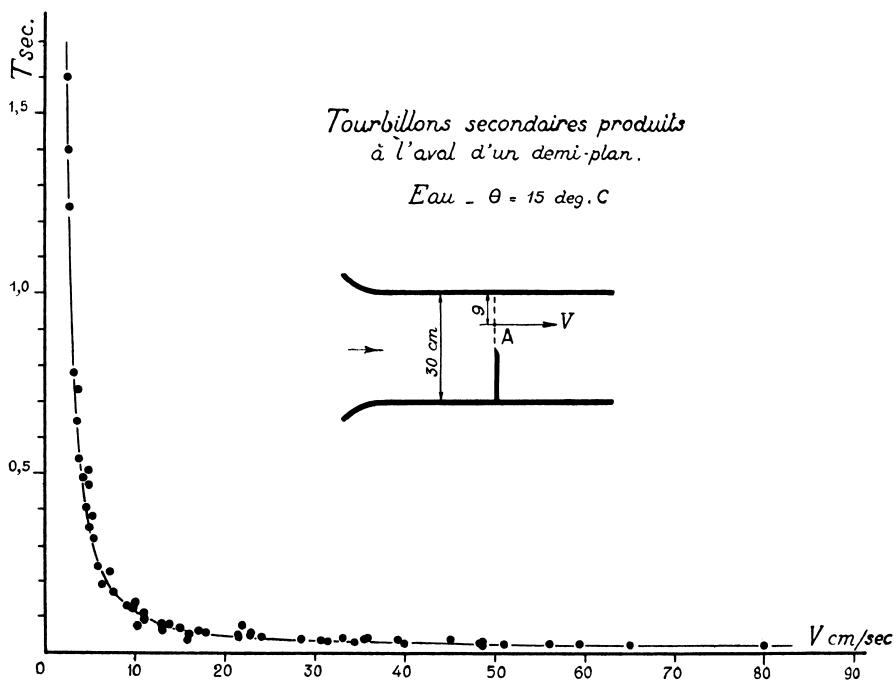


Fig. 41. Tourbillons secondaires formés à l'aval d'un demi-plan immergé dans l'eau : la période varie avec la vitesse selon la similitude de Reynolds $T \propto V^{-2}$ [35].

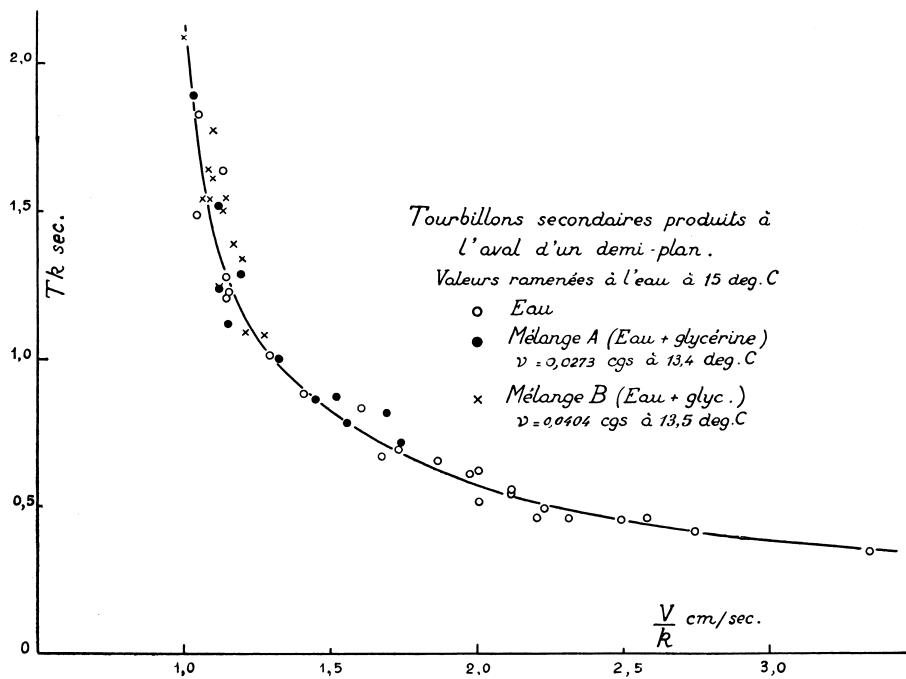


Fig. 42. Tourbillons secondaires formés à l'aval d'un demi-plan : similitude de Reynolds des périodes pour des fluides de viscosités différentes. La courbe correspond à $Tk = 2.0(V/k)^{-2}$, soit $V\sqrt{T/\nu} = \text{Cte}$ [35].

Des expériences sont également réalisées avec des liquides de viscosités différentes. Notant $k = \nu/\nu_{\text{eau}}$ le rapport des viscosités cinématiques, le tracé de la période Tk en fonction de la vitesse V/k regroupe bien les points de mesure (Fig. 42).

« Ceci montre que, du moins pour les vitesses envisagées, qui sont d'ailleurs relativement faibles, la similitude de Reynolds s'applique au phénomène des tourbillons secondaires, lorsque dans le modèle considéré, on fait varier la viscosité du liquide utilisé. »

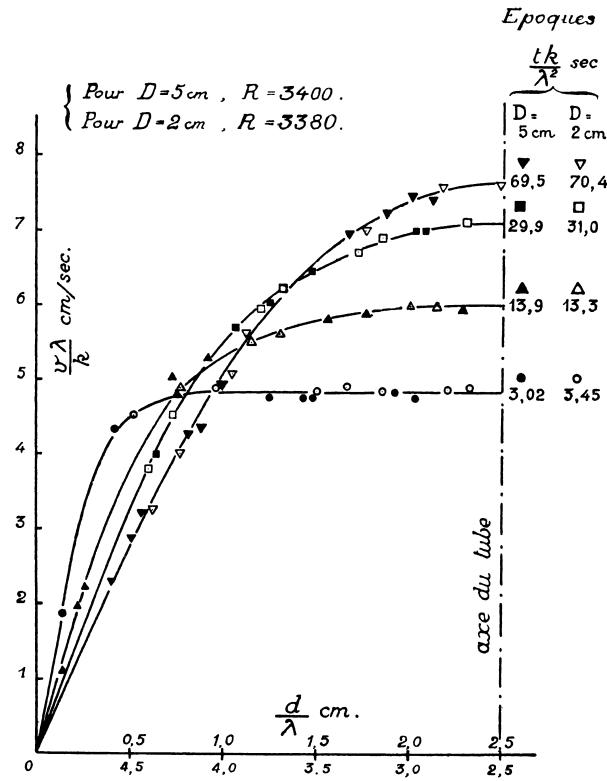


Fig. 43. Transitoire d'établissement du profil radial des vitesses à des instants homologues, dans une section droite éloignée de l'entrée du tube, pour de l'eau et deux tubes de diamètres différents ($\lambda = 1$ et $\lambda = 2/5$) et un même nombre de Reynolds final [35].

Des conclusions analogues sont obtenues pour les tourbillons à l'aval d'un cylindre, où intervient le diamètre comme nouveau paramètre : les points se regroupent sur une courbe dans le plan $(Tk/\lambda^2, V\lambda/k)$, où λ est le rapport des diamètres.

3.7. Régimes transitoires

Les thèses de Causse [35] et Baubiac [19] rapportent de nombreux résultats remarquables relatifs à divers régimes transitoires ou périodiques, notamment sur la mise en vitesse d'un liquide visqueux dans une conduite en charge, l'écoulement oscillant dans un tube, l'établissement d'un sillage autour d'un obstacle, et la résistance des corps immersés en mouvement non uniforme. Les résultats sont analysés dans le cadre des lois de similitude des écoulements visqueux, ou non visqueux, selon le cas. Causse note en particulier [35] :

« Il peut exister, dans un même ouvrage, des régions où le mouvement du liquide est fonction de la viscosité de ce liquide, et d'autres régions, où, par suite de l'existence d'un potentiel des vitesses, l'écoulement peut, dans une certaine mesure tout au moins, être indépendant de cette viscosité. Il était intéressant, croyons-nous, d'étudier, pour ces raisons, la mise en vitesse dans chacun de ces deux cas. »

Seuls sont résumés ci-dessous les résultats relatifs à la mise en vitesse et à la transition à la turbulence dans une conduite.

3.7.1. Mise en vitesse de l'écoulement de Poiseuille dans un tube

La question porte ici sur la durée de l'établissement du régime permanent, et la loi de similitude de cette durée. Elle se pose différemment à l'entrée du tube, où l'écoulement est essentiellement potentiel, et loin de l'entrée, où la viscosité intervient. Les expériences sont menées dans une conduite horizontale, alimentée par un bassin à niveau constant, dont l'extrémité aval peut être ouverte très rapidement, sur une durée, contrôlée, de l'ordre d'une milliseconde. La vitesse est mesurée par la méthode chronophotographique décrite précédemment, faisant intervenir des disques d'obturation à fentes (Fig. 27) ou le déplacement du film photographique dans une direction normale à celle de l'écoulement.

L'évolution au cours du temps du profil radial des vitesses, dans une section éloignée de l'entrée, est montrée sur la Fig. 43, pour deux diamètres de conduite et pour de l'eau. Le profil, plat dans les premiers instants, se déforme à partir des parois et évolue vers le profil parabolique du régime de Poiseuille. La superposition des profils pour deux diamètres

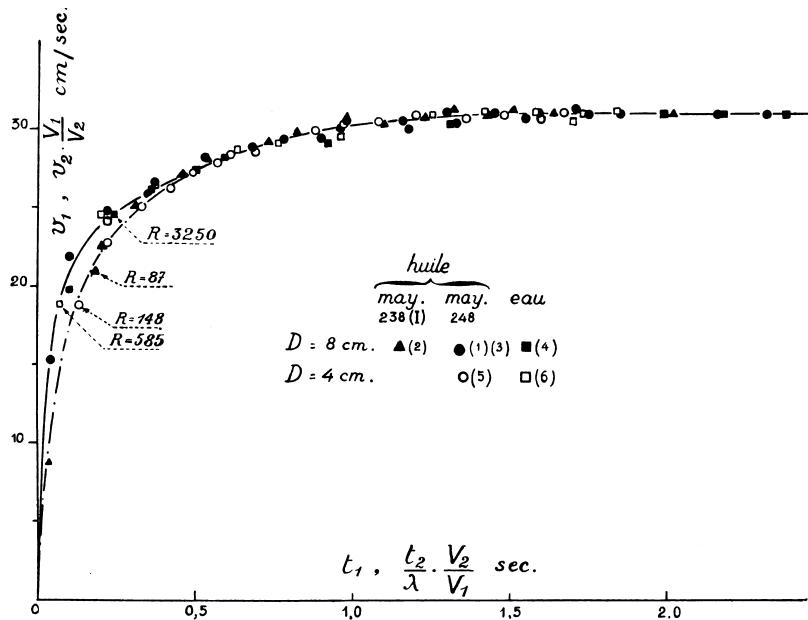


Fig. 44. Loi de mise en vitesse, sur l'axe du tube, dans une section située à deux diamètres à l'aval de l'entrée de la conduite. La viscosité varie d'un facteur 450 [35].

différents, à des temps homologues, montre la similitude de Reynolds du phénomène. En effet, dans deux mouvements 1 et 2, cette similitude implique que les vitesses et temps homologues sont liés par les relations

$$v_1 = v_2 \lambda k^{-1}, \quad t_1 = t_2 \lambda^{-2} k$$

où λ et k sont respectivement les rapports des diamètres et des viscosités. D'autres expériences avec des fluides de viscosités différentes ($k \neq 1$) confirment que le temps d'établissement de l'écoulement permanent est gouverné par la similitude de Reynolds.

« On observe en somme *dans le temps* un phénomène qui rappelle celui dont on peut constater l'existence *dans l'espace* une fois le régime permanent établi, en considérant la distribution des vitesses dans diverses sections droites progressivement distantes de l'entrée d'un tube. » [35].

Comment la durée d'établissement du profil parabolique, déduite du tracé de la vitesse sur l'axe en fonction du temps, varie-t-elle avec le nombre de Reynolds ?

« La valeur théorique de cette durée étant infinie [...], nous avons convenu d'étudier, non la durée d'établissement du régime permanent, mais la durée t_n nécessaire pour que la vitesse atteigne une fraction $1/n$ de sa valeur en régime permanent, [désignée par commodité] «durée du régime transitoire». Nous avons adopté $1/n = 0,95$. » [35]

Deux sections droites sont considérées : l'une au voisinage de l'entrée du tube, et l'autre éloignée de l'entrée, les lois de similitude attendues y étant différentes. Nous ne présentons ici que les résultats relatifs au premier cas, où l'on attend la similitude des fluides parfaits du fait du caractère irrotationnel de l'écoulement. Crausse [35] explique ce qu'on doit attendre pour la loi $v(t)$:

« [Soient m et α le rapport des densités et des pressions en des points homologues de deux modèles 1 et 2.] Si le phénomène est indépendant de la viscosité du liquide utilisé, les relations concernant les valeurs homologues des vitesses [sur l'axe] et des temps pour deux modèles 1 et 2 seront :

$$v_1 = v_2 \sqrt{\frac{m}{\alpha}}, \quad t_1 = \frac{t_2}{\lambda} \sqrt{\frac{\alpha}{m}}$$

Ces relations étant vérifiées, en particulier, lorsque le régime permanent sera établi, on devra avoir, m et α restant constants par hypothèse, $V_1 = V_2 \sqrt{m/\alpha}$, ce qui permet d'écrire :

$$v_1 = v_2 \frac{V_1}{V_2}, \quad t_1 = \frac{t_2}{\lambda} \frac{V_2}{V_1}$$

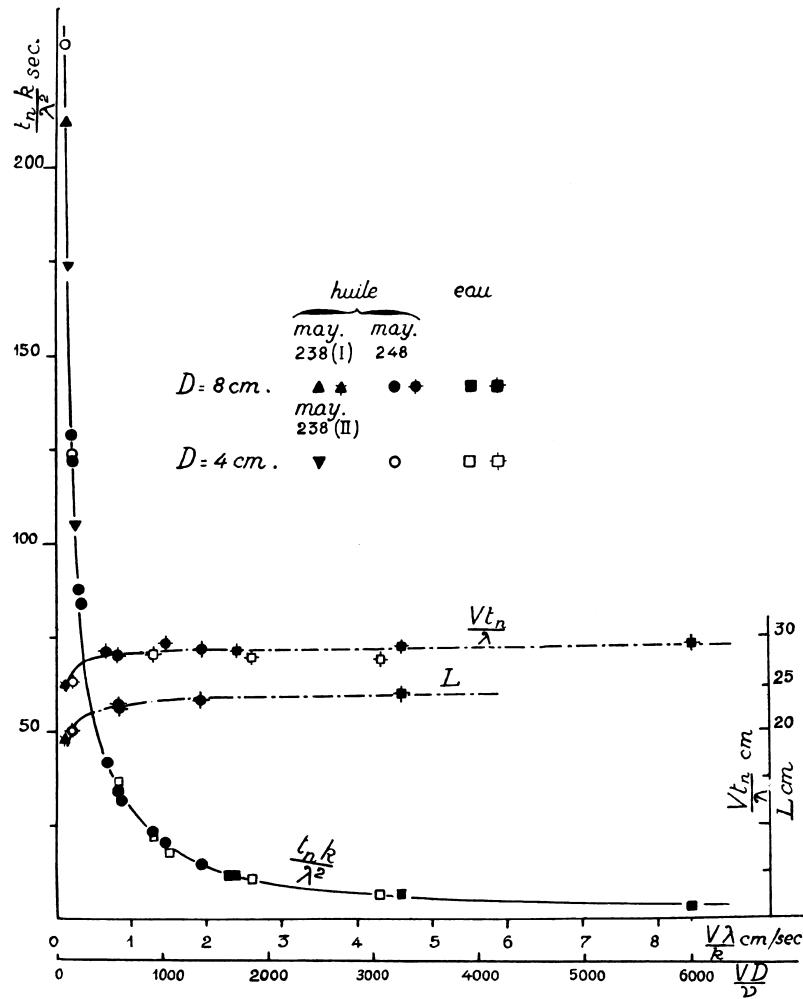


Fig. 45. Durée du régime transitoire en fonction de la vitesse atteinte, dans une section droite voisine de l'entrée de la conduite. Constance de l'échelle de longueur Vt_n/λ lorsque le nombre de Reynolds n'est pas trop faible [35].

En conséquence, si l'on considère, dans deux ouvrages semblables, deux mouvements aboutissant respectivement à des vitesses V_1 et V_2 , on doit pouvoir, si les phénomènes sont indépendants de la viscosité, amener la courbe d'établissement $v(t)$ du deuxième modèle à coïncider avec celle du premier, en multipliant les vitesses par V_1/V_2 et les durées par $V_2/\lambda V_1$, quelles que soient les valeurs de la vitesse et de la viscosité.»

La Fig. 44 montre que la prédiction ci-dessus est bien vérifiée, les points de mesure se regroupant sur une même courbe pour trois viscosités et deux diamètres différents. Des écarts à la courbe apparaissent cependant lorsque le nombre de Reynolds final est faible (ici, inférieur à 585), l'effet des parois se faisant alors ressentir même au voisinage de l'entrée du tube (ici, à deux diamètres de l'entrée).

La durée t_n en fonction de la vitesse terminale V est représentée sur la Fig. 45, les grandeurs étant ramenées à une configuration de référence (eau à 15 °C, $D = 5$ cm), et l'axe horizontal correspondant au nombre de Reynolds. Les points se regroupent sur une hyperbole équilatérale correspondant à $Vt_n/\lambda = \text{Cte}$, comme attendu. Cette représentation met clairement en évidence que la longueur intégrale Vt_n/λ (ou la longueur L qui en est une autre définition) n'est plus constante lorsque $VD/v \lesssim 500$: la similitude des fluides parfaits n'est plus vérifiée.

3.7.2. Transition à la turbulence

Les fameuses expériences d'Osborne Reynolds sur la transition à la turbulence dans une conduite (1883) ont engendré de nombreuses études, notamment théoriques, autour de Prandtl, Kármán et Geoffrey I. Taylor [56,60]. Baubiac, dans sa thèse [19], présente une étude expérimentale originale de la question du temps d'établissement du régime turbulent. Des expériences préliminaires ont permis de déterminer «le critérium du régime turbulent relatifs aux divers ouvrages géométriquement semblables étudiés. La valeur trouvée est $R_c = 3640$ », où R_c est défini avec la vitesse sur l'axe. L'expérience

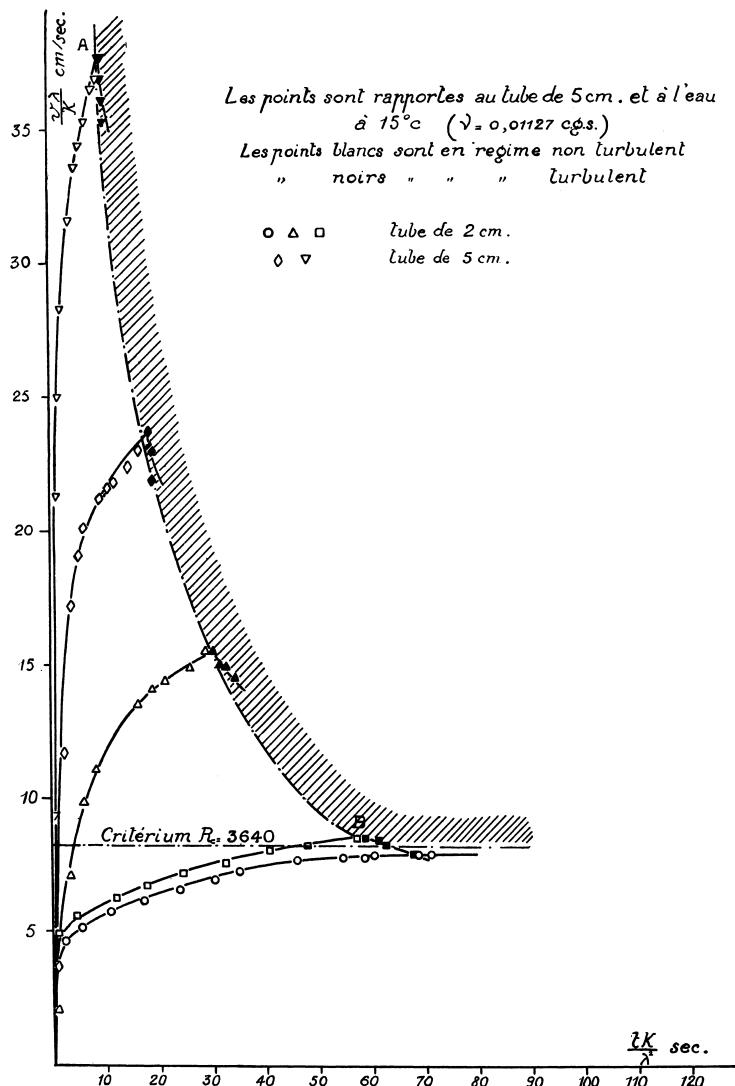


Fig. 46. Variation de la vitesse sur l'axe en fonction du temps, pour divers nombres de Reynolds. Au-delà de $R_c = 3640$, l'écoulement devient turbulent, la transition correspondant à une décroissance de la vitesse [19].

consiste à suivre l'évolution temporelle de la vitesse sur l'axe, comme précédemment, à partir d'une ouverture très rapide de la conduite à l'aval. Les résultats présentés sur la Fig. 46, pour plusieurs nombres de Reynolds, montrent que cette vitesse croît dans un premier temps, puis décroît lorsque la turbulence survient.

Baubiac [19] fait en particulier les observations suivantes, en distinguant deux cas :

- « a) Le nombre de Reynolds atteint en régime permanent, est très supérieur au critérium R_c . Dans ce cas, le régime turbulent apparaît brusquement avec un degré de turbulence élevé. Ce brusque changement d'aspect de l'écoulement est caractérisé par une baisse rapide de la composante de la vitesse [...] [Fig. 46, point A].
- b) Le nombre de Reynolds atteint en régime permanent, est voisin du critérium R_c . L'apparition du régime turbulent se manifeste alors par une baisse lente de la vitesse au point étudié [Fig. 46, point B], sans donner l'apparence d'un changement de régime. Les filets liquides restent en effet parallèles, l'écoulement est laminaire, mais la répartition des vitesses autour du point étudié présente des irrégularités qui vont en s'amplifiant de plus en plus, jusqu'au moment où la configuration habituelle du régime turbulent, avec enchevêtrement des filets, apparaît. On assiste en somme à une lente dislocation du régime non turbulent. »

Permutant les axes, on obtient la Fig. 47, qui représente la durée de la transition à la turbulence en fonction de la vitesse (ou du nombre de Reynolds par un changement d'échelle). L'alignement des points sur une courbe unique, pour deux diamètres de conduite, montre que la similitude de Reynolds s'applique au phénomène.

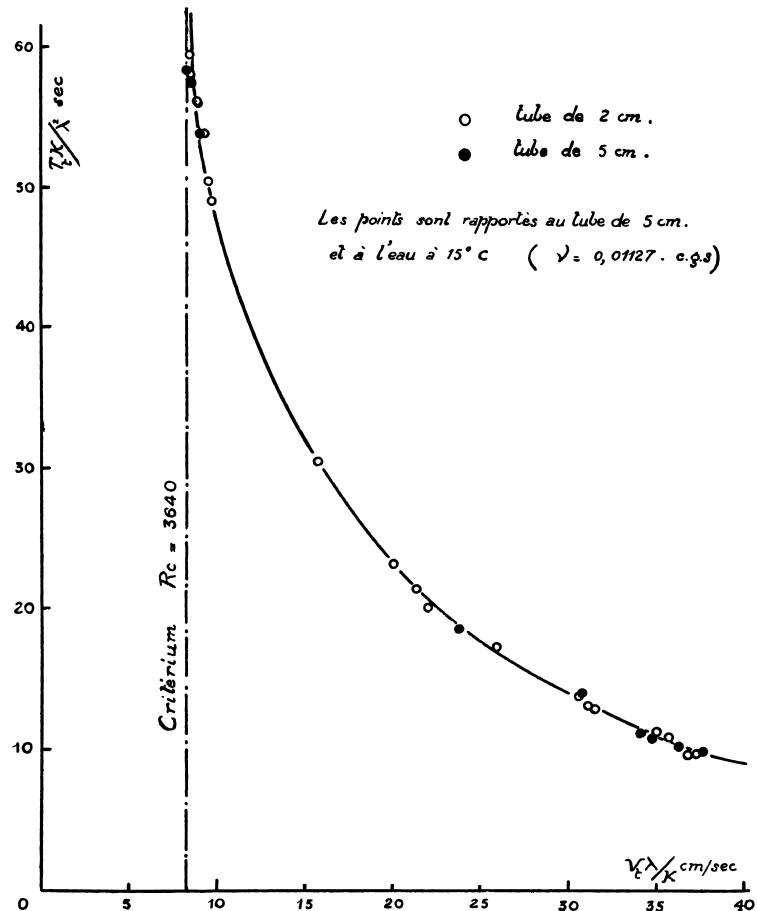


Fig. 47. Variation de la durée d'apparition du régime turbulent en fonction du nombre de Reynolds. Vérification de la loi de similitude [19].

«On voit que la durée d'établissement du régime turbulent est, pour un même ouvrage et un même liquide, d'autant plus longue que le nombre de Reynolds atteint en régime permanent est plus voisin du critérium R_c .

Une question se pose ici, au sujet du tracé de la courbe : que se passe-t-il à la limite, lorsque le nombre de Reynolds en régime permanent tend de plus en plus vers le critérium R_c tout en lui restant supérieur ?

Il est bien évident que, en raison des difficultés d'ordre matériel, il n'est pas possible de pousser l'expérimentation aussi loin, on est fatallement obligé d'arrêter les expériences à un nombre de Reynolds très voisin de R_c , pour lequel on trouve une durée d'établissement du régime turbulent élevée. Si l'on veut continuer le tracé de la courbe, il est nécessaire de procéder à une extrapolation, opération souvent dangereuse en matière expérimentale et nécessitant une très grande prudence.

Deux hypothèses peuvent être envisagées : ou bien la courbe se termine quelque part dans le plan des v, t , en un point correspondant à une durée finie élevée, ou bien elle se prolonge jusqu'à l'infini. [...] La deuxième hypothèse d'après laquelle la courbe se prolongerait jusqu'à l'infini, asymptotiquement à l'axe représentant le critérium, est à notre avis beaucoup plus séduisante. Il serait possible de donner alors une définition théorique très précise du critérium R_c .

Le critérium serait, pour un ouvrage déterminé, le nombre de Reynolds pour lequel [...] on verrait apparaître le régime turbulent au bout d'un temps infini. »

Indiquons, pour terminer ce panorama, une étude de la distribution des vitesses dans une couche limite turbulente, réalisée en 1935 par Étienne Crausse dans le canal d'aménée de l'usine hydroélectrique de Gentille, en Haute-Garonne, lors des essais de réception de cette usine. Il s'agit de tester «les théories dues à Kármán et à Prandtl qui, presque simultanément (1932) et par des développements analogues, aboutirent aux mêmes résultats. [...] [Les mesures montrent que] les profils verticaux de vitesse y obéissent avec une bonne exactitude à la loi logarithmique [...]. Les autres formes usuelles, telles la loi de puissance à exposant convenablement choisi ou la loi parabolique du second degré, représentent moins bien la réalité» [48]. Ces résultats, sans doute la première confirmation de la loi logarithmique à l'échelle d'un ouvrage hydraulique ($R \approx 10^7$), seront publiés en 1943 par l'École française d'ingénieurs de Beyrouth, où Crausse a trouvé un poste de professeur.

4. Pour conclure

Le panorama qui précède, loin d'être exhaustif, témoigne de l'intense activité développée dans le laboratoire d'hydraulique, puis l'institut de mécanique des fluides de Toulouse, par Charles Camichel et l'équipe talentueuse d'ingénieurs et de chercheurs dont il s'était entouré. Les travaux réalisés, alors publiés dans des thèses et des revues aujourd'hui peu accessibles, ou oubliés, méritaient, nous le croyons, d'être rappelés. Ces travaux, associant le souci du développement de l'industrie et une curiosité de chercheur pour les phénomènes fondamentaux, étaient pour certains tout à fait pionniers. Ainsi, notamment, des réflexions autour de la similitude des écoulements dans un ouvrage réel et son modèle réduit, « question qui présente, du point de vue technique, un intérêt considérable [...] mais est également intéressante au point de vue théorique car elle donne des renseignements précieux sur la nature des phénomènes mis en jeu et l'expression des termes qui peuvent les représenter. » Ainsi, également, des réflexions concernant les transitions entre régimes d'écoulement, avec la mise en évidence très novatrice de phénomènes de ralentissement critique. Ces résultats ont été rendus possibles grâce à des remarquables développements de l'instrumentation, notamment la chronophotographie et le fil chaud, permettant d'accéder à des résolutions spatiales inférieures au millimètre et des résolutions temporelles de l'ordre de la milliseconde. Ces résultats éclairent la genèse et le développement d'idées qui figurent aujourd'hui dans l'enseignement classique de la mécanique des fluides, ou annonçaient de fructueux champs de recherche de la physique du XX^e siècle, autour des phénomènes non linéaires (bifurcations), de l'analyse dimensionnelle et des lois d'échelle. Relevons enfin la clarté des idées et de l'expression dont font preuve les thèses, rapports et articles où ont été publiés ces travaux, ainsi que leur ferme concision.

L'institut de mécanique des fluides de Toulouse, tel qu'il existe aujourd'hui, tente toujours de conjuguer les points de vue de l'ingénieur et du physicien, de la « science utile » et de la « science curieuse ». Il doit beaucoup, de ce point de vue, à ses lointains fondateurs.

Remerciements

Les recherches dont est issu cet article, dans divers fonds et archives, doit beaucoup à la mobilisation de l'IMFT autour de la célébration de son centenaire, et particulièrement à Dimitri Aguéra, Muriel Sabater, Henri Boisson et Pierre Crausse, ainsi qu'au soutien de la direction de l'IMFT et de ses tutelles. Qu'ils en soient ici remerciés.

Références¹

- [1] C. Camichel, D. Eydoux, J. Lhériaud, Sur l'ajutage Venturi, *C. R. Acad. Sci. Paris* 160 (1915) 28.
- [2] C. Camichel, Sur les coups de bâlier; oscillations en masse, *C. R. Acad. Sci. Paris* 161 (1915) 343.
- [3] D. Eydoux, Les mouvements de l'eau et les coups de bâlier dans les cheminées d'équilibre, Thèse de doctorat ès sciences physiques de la faculté des Sciences de Toulouse, 1919.
- [4] L. Escande, Étude théorique et expérimentale sur la similitude des fluides incompressibles pesants, Thèse de doctorat ès sciences physiques de la faculté des sciences de l'université de Toulouse, 1929.
- [5] C. Camichel, D. Eydoux, M. Gariel, Étude théorique et expérimentale des coups de bâlier : Essais faits à l'institut électrotechnique de Toulouse et à l'usine hydroélectrique de Soulom, Privat, Toulouse, 1918, In-4°, 398 p.
- [6] C. Camichel, Leçons sur les conduites, Gauthier-Villars, Paris, 1930.
- [7] C. Camichel, D. Eydoux, J. Lhériaud, Expériences sur l'enregistrement des débits, des conduites forcées de l'usine de Soulom, *Lumière Électr.* 26 (31) (1914) 129–139.
- [8] C. Camichel, D. Eydoux, J. Lhériaud, Le jaugeur Venturi, in : Chambre syndicale des forces hydrauliques (Ed.), Rapports qui devaient être présentés au 2e Congrès de la Houille Blanche, à Lyon en sept. 1914, 1914, pp. 23–44.
- [9] C. Camichel, Sur les coups de bâlier; conduite entièrement purgée, *C. R. Acad. Sci. Paris* 161 (1915) 412.
- [10] C. Camichel, Sur les coups de bâlier; examen de l'état d'une conduite, *C. R. Acad. Sci. Paris* 163 (1916) 150.
- [11] C. Camichel, L'amplitude des harmoniques impairs dans les conduites forcées, *Lumière Électr.* 34 (37) (1916) 241–247.
- [12] C. Camichel, Notice sur les travaux scientifiques, Privat, Toulouse, 1929.
- [13] C. Camichel, Supplément à la Notice sur les travaux scientifiques – travaux effectués pendant les années 1930 et 1931, Privat, Toulouse, Septembre 1931.
- [14] C. Camichel, 2e Supplément à la Notice sur les travaux scientifiques – travaux effectués pendant les années 1932 à 1935, Privat, Toulouse, 1935.
- [15] L. Escande, M. Ricaud, Sur la similitude des fluides visqueux, *C. R. Acad. Sci. Paris* 180 (1925) 1326.
- [16] C. Camichel, L. Escande, Similitude hydrodynamique et technique des modèles réduits, in : Publications scientifiques et techniques du ministère de l'Air, vol. 127, 1938, pp. 1–356.
- [17] C. Camichel, J. Leclerc du Sablon, L. Escande, Recherches sur la similitude (suite et fin), *Génie Civ.* 98 (17) (25 avril 1931) 420–424.
- [18] C. Camichel, Rapport sur l'emploi des modèles réduits, in : 3e Congrès de la houille blanche, Grenoble, 1925, p. 11.
- [19] J. Baubiac, Étude expérimentale, en régime transitoire, du sillage et de la résistance des corps immergés, Thèse d'ingénieur-docteur de la faculté des sciences de l'université de Toulouse, 1936.
- [20] C. Camichel, Contribution à l'étude des veines liquides – les indéterminations et les solutions multiples dans leurs rapports avec l'hydraulique fluviale, *Rev. Gén. Hydraul.* 5 (1935) 1–15.
- [21] C. Camichel, J. Parmentier, L. Escande, L'étude des veines liquides – expériences effectuées sur des modèles réduits et au barrage de Vives-Eaux, sur la Seine, *Génie Civ.* 107 (7) (1935) 156–158.
- [22] C. Camichel, Sur la détermination des vitesses dans les liquides, *Rev. Gén. Électr.* 6 (21) (1919) 707–709.
- [23] C. Camichel, Sur le régime permanent dans les chambres d'eau, *Rev. Gén. Électr.* 8 (1920) 331–338.
- [24] M. Pichot, P. Dupin, Sur la répartition des vitesses dans les solutions colloïdales présentant des anomalies de viscosité, *C. R. Acad. Sci. Paris* 192 (18) (1931) 1079.

¹ Les références [13] à [60] ont trait aux travaux de Charles Camichel et coll.

- [25] C. Camichel et collab., Contribution to the study of the flow of viscous liquids, *J. Rheol.* 3 (1932) 413–436.
- [26] C. Camichel, P. Dupin, Sur les divers modes de contraction des filets à l'entrée d'un ajoutage, *C. R. Acad. Sci. Paris* 193 (2) (1931) 102.
- [27] C. Camichel, Sur le régime permanent dans les chambres d'eau, *C. R. Acad. Sci. Paris* 170 (1920) 881.
- [28] C. Camichel, Sur le régime permanent dans les chambres d'eau, *C. R. Acad. Sci. Paris* 170 (1920) 986.
- [29] D. Ledoux, Contribution à l'étude théorique et expérimentale de l'écoulement par déversoir, Thèse de doctorat ès sciences physiques de la faculté des sciences de l'université de Toulouse, 1929.
- [30] C. Camichel, Application du principe des images aux chambres d'eau, *C. R. Acad. Sci. Paris* 170 (1920) 1106.
- [31] C. Camichel, Sur les surfaces de discontinuité, *C. R. Acad. Sci. Paris* 174 (1922) 666.
- [32] C. Camichel, M. Ricaud, Sur les surfaces de discontinuité, *C. R. Acad. Sci. Paris* 178 (1924) 442.
- [33] C. Camichel, L. Escande, M. Ricaud, Sur l'écoulement d'un fluide visqueux autour d'un obstacle, *C. R. Acad. Sci. Paris* 180 (1925) 1557.
- [34] E. Crusse, J. Baubiac, Sur une modification de la méthode chronophotographique et quelques applications, *C. R. Acad. Sci. Paris* 196 (1933) 466.
- [35] E. Crusse, Contribution à l'étude expérimentale de phénomènes transitoires et de phénomènes périodiques se produisant dans les liquides en mouvement, Thèse de doctorat ès sciences physiques de la faculté des sciences de l'université de Toulouse, 1936.
- [36] E. Crusse, J. Baubiac, Sur l'application d'une méthode d'enregistrement thermique à l'étude des tourbillons se produisant dans les liquides, *C. R. Acad. Sci. Paris* 192 (22) (1931) 1355.
- [37] P. Dupin, Étude expérimentale sur les tourbillons alternés de Bénard–Kármán, Thèse de doctorat soutenue à la faculté des sciences de Paris, 1930.
- [38] M. Teissié-Solier, Contribution à l'étude des corps immersés, Thèse de doctorat ès sciences physique de la faculté des sciences de l'université de Toulouse, 1931.
- [39] C. Camichel, P. Dupin, M. Teissié-Solier, Sur l'application de la loi de similitude aux périodes de formation des tourbillons de Bénard–Kármán, *C. R. Acad. Sci. Paris* 185 (1927) 1556.
- [40] P. Dupin, M. Teissié-Solier, Sur les tourbillons alternés en régime non turbulent et en régime turbulent, *C. R. Acad. Sci. Paris* 190 (15) (1930) 920.
- [41] P. Dupin, M. Teissié-Solier, Sur les tourbillons alternés de Bénard–Kármán et la loi de similitude hydrodynamique de Reynolds, *C. R. Acad. Sci. Paris* 192 (17) (1931) 1017.
- [42] C. Camichel, Sur les tourbillons provoqués par un obstacle immergé dans un courant liquide, *C. R. Acad. Sci. Paris* 184 (1927) 1509.
- [43] C. Camichel, M. Teissié-Solier, Influence d'une perturbation sur le sillage en régime de Poiseuille d'un corps immergé, *C. R. Acad. Sci. Paris* 200 (1935) 704.
- [44] M. Teissié-Solier, L. Castagnetto, Sur la détermination du critérium des tourbillons alternés et les oscillations de relaxation, *C. R. Acad. Sci. Paris* 206 (1938) 1279.
- [45] P. Dupin, Sur la vibration des tiges cylindriques dans l'eau sous l'influence des tourbillons alternés, *C. R. Acad. Sci. Paris* 191 (1930) 482.
- [46] P. Dupin, E. Crusse, Sur les vibrations des tiges cylindriques dans l'eau sous l'influence des tourbillons alternés, *C. R. Acad. Sci. Paris* 192 (12) (1931) 729.
- [47] E. Crusse, J. Baubiac, Sur les tourbillons secondaires se produisant à l'aval d'un obstacle immergé dans un liquide, *C. R. Acad. Sci. Paris* 192 (24) (1931) 1529.
- [48] É. Crusse, Résultats expérimentaux concernant la répartition des vitesses en canaux découverts, in: Publications scientifiques et techniques de l'École française d'ingénieurs de Beyrouth, 1943.
- [49] F.C. Charru (dir.), L'institut de mécanique des fluides de Toulouse – 100 ans de recherches, CNRS Éditions, 2016.
- [50] A. Grelon, Les universités et la formation des ingénieurs en France (1870–1914), *Form. Empl.* 27–28 (1989) 65–88.
- [51] M. Grossetti (dir.), Villes et institutions scientifiques, Rapport final du programme CNRS PIR-Villes, 1996.
- [52] Discours de Charles Camichel pour la réception de son épée d'académicien, extrait du Bulletin de l'association amicale des ingénieurs anciens élèves de l'IETMA de Toulouse, Les Frères Douladoure, Toulouse, 1936.
- [53] D. Guthleben, Histoire du CNRS de 1939 à nos jours, Armand Colin, 2013.
- [54] H. Rouse, S. Ince, History of Hydraulics, Dover, New York, 1957.
- [55] H. Lamb, Hydrodynamics, 6^e édition, Cambridge University Press, 1932.
- [56] O. Darrigol, Worlds of Flow: A History of Hydrodynamics from the Bernoullis to Prandtl, Oxford University Press, 2005.
- [57] S. Goldstein, Fluid mechanics in the first half of this century, *Annu. Rev. Fluid Mech.* 1 (1969) 1–29.
- [58] M. Brillaquin, Les surfaces de glissement d'Helmholtz et la résistance des fluides, *Ann. Chim. Phys.* 23 (1911) 145–230.
- [59] J.E. Wesfreid, Scientific biography of Henri Bénard (1874–1939), in: Dynamics of Spatio-Temporal Cellular Structures: Henri Bénard Centenary Review, Springer, 2006, pp. 9–37.
- [60] M. Eckert, The troublesome birth of hydrodynamic stability theory: Sommerfeld and the turbulence problem, *Eur. Phys. J. H* 35 (2010) 29–51.