



HAL
open science

Courants, Ondes et Turbulences

François Charru

► **To cite this version:**

François Charru. Courants, Ondes et Turbulences. EDP Sciences, 2024, 978-2-7598-3701-4.
10.1051/978-2-7598-3701-4 . hal-04904507

HAL Id: hal-04904507

<https://hal.science/hal-04904507v1>

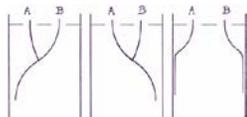
Submitted on 21 Jan 2025

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

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



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0
International License



S C I E N C E S & H I S T O I R E

COURANTS, ONDES & TURBULENCES

FRANÇOIS CHARRU

L'INSTITUT ÉLECTROTECHNIQUE DE TOULOUSE,
1907-1968

COURANTS, ONDES & TURBULENCES

L'INSTITUT ÉLECTROTECHNIQUE DE TOULOUSE, 1907-1968

FRANÇOIS CHARRU

Portées par une société enthousiasmée par le monde nouveau que lui ouvre l'électricité — télégraphie et téléphonie, éclairage, moteurs électriques... —, les facultés des sciences des universités françaises créent au début du XXe siècle plusieurs instituts électrotechniques. Celui de Toulouse, créé en 1907 par Charles Camichel, connaît un essor exceptionnel. Un laboratoire d'hydraulique lui est adjoint en 1913, en liaison avec le développement de l'hydroélectricité pyrénéenne. Ce laboratoire est absorbé en 1930 dans un nouvel institut de mécanique des fluides créé à l'instigation du ministère de l'Air pour le développement de l'aéronautique. Les recherches scientifiques menées acquièrent une réputation internationale. L'institut électrotechnique est transformé en 1948 en École nationale supérieure d'ingénieur et de nouveaux laboratoires sont alors créés autour de l'électrotechnique et de l'électronique, puis des mathématiques appliquées et de l'informatique. Aujourd'hui, plus de la moitié du potentiel de recherche toulousain en ingénierie est issu des initiatives de Charles Camichel. Cet ouvrage retrace cette riche histoire dans toutes ses dimensions, scientifiques, techniques et sociales.

François Charru est professeur émérite à l'université Paul Sabatier de Toulouse, chercheur à l'institut de mécanique des fluides de Toulouse (IMFT) et chercheur associé au laboratoire SPHere (Science-Philosophie-Histoire, CNRS-Paris Cité). Ses recherches ont porté sur les instabilités hydrodynamiques, sur les milieux granulaires, puis sur l'histoire de la mécanique. Il a été directeur de l'IMFT, membre du Conseil national des universités, membre du Comité national de la recherche scientifique, et délégué français à l'Assemblée générale de l'Union internationale de la mécanique théorique et appliquée (IUTAM).

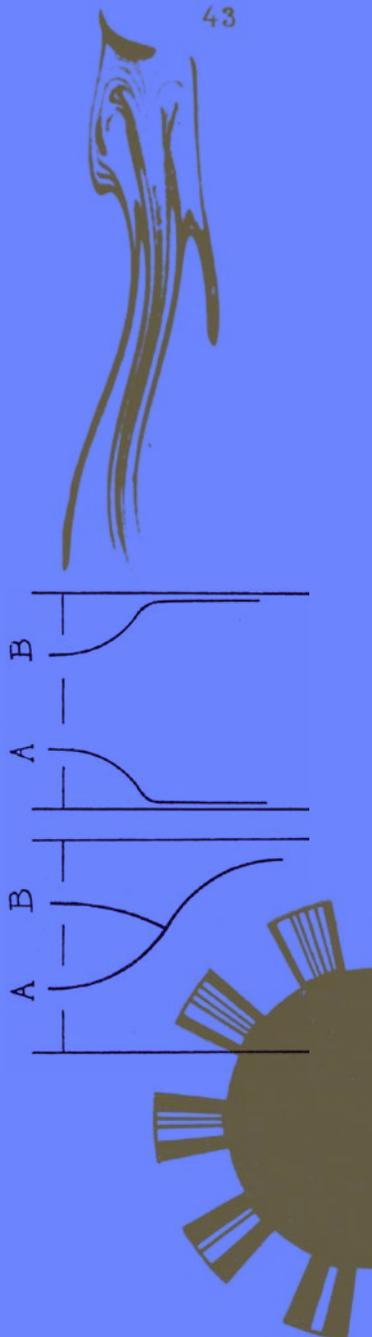


ISBN : 978-2-7598-3701-4

www.edpsciences.org

edp sciences

43



Courants, Ondes et Turbulences

L'institut électrotechnique de Toulouse
1907-1968

François Charru



17, avenue du Hoggar
Parc d'Activité de Courtabœuf, BP 112
91944 Les Ulis Cedex A, France

« *Sciences & Histoire* »

La collection « Sciences & Histoire » s'adresse à un public curieux de sciences. Sous la forme d'un récit ou d'une biographie, chaque volume propose un bilan des progrès d'un champ scientifique, durant une période donnée. Les sciences sont mises en perspective, à travers l'histoire des avancées théoriques et techniques et l'histoire des personnages qui en sont les initiateurs.

Photo de couverture : Charles Camichel célébré dans son village natal, le 29 novembre 1936, pour son élection à l'Académie des sciences de l'Institut de France. Une rue du village porte aujourd'hui son nom (Arch. A. Nos, Montagnac).

Imprimé en France

ISBN (papier) : 978-2-7598-3701-4 – ISBN (ebook) : 978-2-7598-3702-1

DOI : 10.1051/978-2-7598-3701-4

Cet ouvrage est publié en Open Access sous licence creative commons CC-BY-NC-ND (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>) permettant l'utilisation non commerciale, la distribution, la reproduction du texte, sur n'importe quel support, à condition de citer la source.

© François Charru, 2024

Table des matières

Préface	vii
Avant-propos	1
Chapitre 1. L'électricité, un monde nouveau	3
1.1. L'Exposition internationale d'électricité de 1881	4
1.2. De la pile de Volta à l'électron	10
1.2.1. De Volta à Maxwell et Hertz	11
1.2.2. Une floraison d'applications	15
1.2.3. À l'aube d'une nouvelle physique	23
1.2.4. Contributions des physiciens français	26
1.3. L'électrification de la France et l'hydroélectricité	28
1.3.1. Électrification du pays	28
1.3.2. Essor de l'hydroélectricité	30
1.3.3. Réseaux de distribution et interconnexions	36
1.4. De l'électron à l'électronique	38
1.4.1. Une nouvelle physique	38
1.4.2. Diffusion des nouvelles idées	41
1.4.3. Avènement de l'électronique	43
Chapitre 2. Enseignement supérieur et recherche	47
2.1. L'enseignement supérieur sous la III ^e République	48
2.1.1. Renouveau des universités	48
2.1.2. Organisation des facultés	49
2.2. Essor des sciences appliquées	52
2.2.1. Des facultés des sciences ouvertes	52
2.2.2. L'électricité dans les écoles d'ingénieurs	53
2.3. L'entre-deux-guerres	61
2.3.1. Un contexte national en dents de scie	61
2.3.2. La recherche, nouvelle priorité nationale	62
2.3.3. Création des instituts d'université	66
2.3.4. Le doctorat d'ingénieur-docteur (1923)	71
2.3.5. Débats sur le titre d'ingénieur	74
Chapitre 3. Les instituts électrotechniques	77
3.1. L'institut de Nancy	78
3.2. L'institut de Grenoble	83
3.2.1. De l'institut électrotechnique à l'institut polytechnique	83

3.2.2. Le lent démarrage de la recherche	89
3.2.3. La Société hydrotechnique de France (SHF)	94
3.3. L'institut de Lille	95
Chapitre 4. L'institut électrotechnique de Toulouse	105
4.1. Synergies universitaires et municipales	105
4.1.1. Réveil universitaire	106
4.1.2. Les sciences appliquées	110
4.2. Genèse de l'institut électrotechnique	112
4.2.1. Charles Camichel	112
4.2.2. Essor de l'enseignement de l'électricité	113
4.2.3. Mobilisation municipale	116
4.2.4. De la chaire municipale à l'institut électrotechnique	122
4.2.5. Henri Bouasse	127
4.3. De l'électrotechnique à la mécanique appliquée	129
4.3.1. Essor initial	130
4.3.2. Évolution de la scolarité	133
4.3.3. Laboratoires d'enseignement	136
4.3.4. Laboratoires de recherches	145
4.4. L'IETMA entre les deux guerres	146
4.4.1. Contexte général de l'entre-deux-guerres	146
4.4.2. Population étudiante et scolarité	147
4.4.3. Personnel enseignant	150
4.4.4. Transformation en institut d'université	153
4.4.5. Émergence de la radioélectricité	154
Chapitre 5. Vers la mécanique appliquée	157
5.1. L'hydroélectricité pyrénéenne	157
5.2. Développement de la mécanique appliquée	164
5.2.1. Enjeux industriels régionaux et nationaux	164
5.2.2. Le laboratoire d'hydraulique	166
5.2.3. Premières études	169
5.3. Extension du laboratoire sur l'île du Ramier	173
5.3.1. Premières expérimentations sur le « canal courbe »	173
5.3.2. Un nouveau canal pour l'hydraulique fluviale	178
5.3.3. Rayonnement national et international	181
Chapitre 6. L'institut de mécanique des fluides	183
6.1. Contexte national	183
6.1.1. Les débuts de l'aéronautique française (1905-1928)	183

6.1.2. Premières institutions pour l'aérodynamique	185
6.1.3. Une politique nationale pour la mécanique des fluides	188
6.2. L'institut de mécanique des fluides de Toulouse	191
6.2.1. Contexte aéronautique régional	191
6.2.2. Création de l'institut	192
6.2.3. L'IMFT dans les années 1930	196
6.2.4. La soufflerie aérodynamique	202
6.3. Rayonnement de la mécanique des fluides toulousaine	204
6.4. La période de la guerre	206
6.4.1. Toulouse ville de repli	207
6.4.2. Activité de la soufflerie	209
6.4.3. L'aéronautique nationale sous le gouvernement de Vichy	214
6.4.4. L'institut de mécanique des fluides de Lille	215
6.4.5. Le « laboratoire plat » pour l'hydraulique	224
Chapitre 7. Œuvre scientifique	227
7.1. Contexte national et international	228
7.2. Hydraulique des barrages et conduites forcées	229
7.2.1. Ondes dans les conduites	229
7.2.2. Évacuateurs de crues	234
7.3. Similitude des écoulements	236
7.3.1. Lois de similitude	236
7.3.2. Similitude des « ouvrages courts »	239
7.3.3. Résistance à l'avancement de corps tombants	242
7.4. Hydraulique fluviale	245
7.4.1. Veine liquide débouchant dans un élargissement brusque	246
7.4.2. Écoulements à surface libre	249
7.4.3. Expériences au barrage de Vives-Eaux	250
7.5. Chronophotographie et cinématographie	253
7.5.1. Principe	253
7.5.2. Mesure de la vorticité et de l'accélération	257
7.5.3. Régimes transitoires	258
7.5.4. Mesures par fil chaud et autres techniques	258
7.6. Tourbillons alternés de Bénard-Kármán	260
7.6.1. Sillage proche et surfaces de discontinuité	260
7.6.2. Brève histoire des tourbillons de sillage	263

7.6.3. Sillage stationnaire et apparition des tourbillons alternés	264
7.6.4. Relations de similitude	267
7.6.5. Durée d'établissement du « régime turbulent »	273
7.6.6. Vibrations de tiges encastrées et de fils tendus	275
7.7. Tourbillons « secondaires » des couches cisaillées	279
7.7.1. Description du phénomène	279
7.7.2. Relations de similitude	282
7.8. Régimes transitoires	283
7.8.1. Mise en vitesse de l'écoulement de Poiseuille	284
7.8.2. Transition à la turbulence en conduite	289
7.9. Postérité des recherches réalisées	293
Chapitre 8. De l'IET à l'ENSEHT	295
8.1. Contexte national de l'après-guerre	296
8.1.1. Nouveaux enjeux pour l'éducation nationale	296
8.1.2. Massification de l'enseignement supérieur	298
8.1.3. La recherche, « ardente obligation » politique	301
8.2. De l'IET à l'ENSEHT	307
8.2.1. Les sciences appliquées à la faculté des sciences de Toulouse	307
8.2.2. Les dernières années de l'IET	309
8.2.3. L'ENSEHT de 1948 à 1967	313
8.3. Le laboratoire d'hydraulique	323
8.3.1. L'âge d'or de l'hydroélectricité	323
8.3.2. Le renouveau scientifique des années 1960	329
8.3.3. Destinée de l'institut de mécanique des fluides	331
8.4. Les laboratoires d'électrotechnique	336
8.4.1. Le laboratoire d'électrotechnique et d'électricité industrielle	338
8.4.2. Un nouveau laboratoire de génie électrique	341
8.5. Les laboratoires d'électronique	344
8.5.1. Le laboratoire de radioélectricité	345
8.5.2. Le laboratoire de semiconducteurs	346
8.6. Épilogue	347

ANNEXES

Annexe A. Thèses soutenues à l'IET-ENSEHT de 1907 à 1967	351
Annexe B. Convention de création de l'institut électrotechnique de Toulouse (1907)	355
Annexe C. Charles Camichel	357
Annexe D. Titres et distinctions de Léopold Escande	361
Annexe E. Sources documentaires	363
Références	367
Index	381

Préface

Faire l'histoire des enseignements et des recherches techniques

Dans les travaux en histoire des sciences et des institutions scientifiques, les chercheurs français ont longtemps privilégié les sciences considérées comme fondamentales (mathématiques, physique, etc.), les institutions les plus prestigieuses (les « grandes écoles ») et les sources nationales. Ce sont plutôt des historiens étatsuniens (Marie-Jo Nye, Harry Paul, Robert Fox, John Burney et d'autres) qui se sont intéressés à la province française et aux enseignements techniques. Ils ont été rejoints par quelques chercheurs français parmi lesquels il faut souligner l'œuvre centrale d'André Grelon, qui a su engager de nombreux jeunes chercheurs dans cette voie. Entre autres résultats, ces travaux ont permis de comprendre que la vie scientifique n'a jamais été complètement concentrée dans la région parisienne et que, notamment après 1870, les facultés des sciences de province ont généré des instituts de formation et des laboratoires très novateurs.

L'Institut électrotechnique de Toulouse a très tôt figuré parmi les cas les plus intéressants à cause de son financement par la Ville de Toulouse, de l'implication, en tant que doyen de la faculté des Sciences, de Paul Sabatier, qui devait plus tard recevoir le prix Nobel pour ses recherches en chimie, du nombre d'étudiants qu'il a attirés et des nombreux laboratoires et formations qui en sont issus, directement ou indirectement. L'histoire de sa fondation était relativement bien connue, de même que l'extension que lui a donnée la création d'un institut de mécanique des fluides en 1930. Mais il manquait à l'histoire institutionnelle globale une analyse plus précise des enjeux scientifiques, des recherches conduites, des personnels, tout ce qui permet de passer d'un canevas un peu abstrait qui tient en quelques pages à une réalité humaine et sensible, à une véritable histoire des recherches également, qui demande un espace d'expression plus vaste et une maîtrise des enjeux scientifiques et techniques.

Tout l'intérêt de l'ouvrage de François Charru est d'opérer ce passage sans pour autant se noyer dans les détails, en gardant une trame claire et en resituant toujours l'importance relative des choix effectués par les personnes impliquées dans cette histoire. Trop de spécialistes des sciences de la nature et de la technique qui se consacrent sur le tard à l'histoire de leur discipline le font sans trop se préoccuper de la dimension sociale et des travaux de sciences sociales. François Charru a pris soin de lire ces travaux, bien au-delà de ceux qu'il cite, notamment dans le domaine des études sociales sur les sciences. Il a donc pu s'appuyer sur ces travaux et les combiner avec ses compétences d'enseignant-chercheur en mécanique des fluides et avec son expérience de membre et de directeur de l'institut de mécanique des fluides pour analyser des sources nouvelles

ou retravailler des sources déjà connues. Le résultat de ce travail considérable est une histoire à la fois précise et claire d'une entreprise scientifique qui court sur une soixantaine d'années. Comme toujours, ce qui est au départ l'initiative de quelques personnes dans un contexte national et local qui se révèle momentanément favorable, devient au fil des années un collectif institutionnalisé, qui poursuit ses activités au moment où ces lignes sont écrites.

L'histoire de l'Institut électrotechnique de Toulouse n'a rien d'anecdotique. Sur le plan local c'est là que trouve sa source une grande partie des formations et des laboratoires d'ingénierie de Toulouse, une des villes françaises où des spécialités comme l'électricité, l'électronique, l'automatique ou l'informatique ont été et restent les plus développées. À travers l'histoire de cet institut, on peut donc appréhender certains aspects de l'évolution de l'ensemble des enseignements et des recherches dans ce domaine en France, mais aussi dans le monde. De l'électricité comme source nouvelle d'énergie, on passe à l'hydraulique et la mécanique des fluides à travers l'équipement des hautes chutes et la construction des barrages, puis à l'électronique avec l'essor des « courants faibles », l'automatique qui en est issue, les mathématiques appliquées et l'informatique à travers les moyens de calculs nouveaux apparus après la Seconde Guerre mondiale. Pour chaque évolution scientifique, le fragile institut créé par Camichel s'adapte, génère de nouvelles formations et des équipes de recherche, dans des équilibres changeants entre enseignement, recherche et relations industrielles. C'est l'histoire passionnante de ces adaptations que nous raconte ce livre, qui fera référence.

Michel Grossetti

Directeur de recherche au CNRS
et directeur d'études à l'EHESS

Avant-propos

Et les roses de l'électricité s'ouvrent encore
Dans le jardin de ma mémoire

Guillaume Apollinaire, *Alcools*, 1913

Les phénomènes électriques et magnétiques découverts dans les laboratoires au cours du XIX^e siècle engendrent alors une floraison d'inventions spectaculaires : télégraphie, électrochimie, éclairage, moteur électrique, radiophonie, applications médicales, etc. Ces inventions révolutionnent la vie quotidienne et alimentent une ardente foi collective dans le « Progrès », dans toutes ses dimensions – scientifique et technique mais aussi industrielle, économique, sociale et même « morale ». Ce progrès, rendu plus impératif encore par l'épreuve de la défaite de 1870 contre la Prusse, inspire largement la profonde réforme de l'enseignement supérieur qu'engage la Troisième République. Les universités régionales bientôt créées développent vigoureusement les sciences appliquées, avec un soutien actif des municipalités, en particulier dans les domaines de l'agriculture, de la chimie, de la mécanique et de l'électricité. C'est ainsi que naissent entre 1900 et 1907, au côté d'écoles d'ingénieurs telles que l'École supérieure d'électricité de Paris, quatre instituts électrotechniques dans les facultés des sciences de Nancy, Grenoble, Lille et Toulouse.

Le présent ouvrage s'attache à restituer l'histoire de ce dernier, l'institut électrotechnique de Toulouse, en inscrivant cette histoire dans celle des sciences appliquées et, plus largement, dans celle d'une société éprise de progrès et dont l'imaginaire artistique et littéraire se trouve également renouvelé. La perspective est donc celle des *science studies* qui envisagent l'histoire des sciences comme une science sociale et non plus comme l'histoire des seules découvertes scientifiques. On y croise des personnalités scientifiques de premier plan et de sensibilités diverses – notamment Paul Sabatier, prix Nobel de chimie 1912, catholique conservateur, et Charles Camichel, fondateur de l'institut électrotechnique, membre de l'Académie des sciences, protestant socialisant –, soutenus par une municipalité fortement mobilisée autour de son maire Albert Bedouce – franc-maçon, député socialiste, ministre du Front populaire –, et par une entreprise industrielle, la Compagnie des chemins de fer du Midi, très active dans le développement économique du sud-ouest de la France.

L'institut créé en 1907 par Camichel, fondation de la Ville de Toulouse, connaît un essor exceptionnel : il compte en 1913 près de 600 étudiants – dont de nombreux étrangers d'Europe de l'Est –, soit plus de la moitié de la population de la faculté des sciences. L'adjonction à cet institut d'un laboratoire d'hydraulique consacre une nette inflexion vers la mécanique, inflexion soutenue par le ministère des Travaux publics et par la Compagnie du Midi qui, pour la traction ferroviaire, développe l'hydroélectricité dans les Pyrénées et le Massif central. Ce laboratoire acquiert dans les années 1920 une forte notoriété, nationale et internationale, tant auprès de l'industrie qu'au sein du milieu académique. C'est ainsi que le ministère de l'Air, soucieux de stimuler la recherche aéronautique, lui associe en 1930 un institut de mécanique des fluides, dont la vocation spécifique portera sur l'étude

des coques d'hydravions. Doté de moyens importants, ce nouvel institut s'enrichit en 1936 d'une grande soufflerie pour les essais de maquettes d'avion. Cette soufflerie connaît pendant la guerre une activité considérable, liée au repli à Toulouse de laboratoires d'aérodynamique et de services du ministère de l'Air, activité largement encadrée par la politique de collaboration du gouvernement de Vichy.

Au lendemain de la guerre, l'institut électrotechnique, dirigé par Léopold Escande qui a succédé à Camichel, est transformé en École nationale supérieure d'ingénieurs (ENSI). L'enseignement supérieur connaît alors une période de forte croissance, tandis que la recherche scientifique est promue par la nouvelle Cinquième République au rang d'« ardente obligation » politique. Stimulée par la décentralisation à Toulouse d'activités liées à l'industrie aéronautique et spatiale, l'école se diversifie alors vers l'électronique, les mathématiques appliquées, l'informatique et l'automatique, tandis qu'émergent, à l'échelle toulousaine, de nouveaux laboratoires de recherche dans ces disciplines.

Aujourd'hui, plus d'un siècle après la création de l'institut électrotechnique, les bénéfices pour l'université de Toulouse liés à cette création apparaissent tout à fait remarquables : les laboratoires engendrés rassemblent 60 % du potentiel toulousain de recherche en ingénierie, de la mécanique au génie électrique, des mathématiques appliquées à l'automatique et à l'informatique.

Le premier chapitre de l'ouvrage situe les enjeux liés à l'électricité à la fin du XIX^e siècle et les espoirs que suscite alors cette science dans le grand public. Les deux chapitres suivants présentent l'organisation de l'enseignement supérieur sous la Troisième République, puis, plus spécifiquement, l'histoire des instituts électrotechniques de Nancy, Grenoble et Lille. La suite de l'ouvrage porte sur l'institut toulousain : sa genèse sous l'autorité de Camichel (chapitre 4), son inflexion vers l'hydraulique en liaison avec l'hydroélectricité (chapitre 5), et l'adjonction en 1930 d'un nouvel institut de mécanique des fluides fondé par le ministère de l'Air (chapitre 6). Ce chapitre 6 discute également les activités scientifiques à Toulouse au cours de la guerre et sous le gouvernement de Vichy. Le chapitre 7 offre un panorama des travaux scientifiques en hydraulique et mécanique des fluides réalisés dans l'entre-deux-guerres. Le huitième et dernier chapitre discute les évolutions survenues dans les années cinquante et soixante, marquées notamment par la transformation de l'institut électrotechnique en ENSI et par l'émergence de nouveaux laboratoires de recherche dans les domaines de l'électrotechnique et de l'électronique.

La matière documentaire originale dont est issu l'ouvrage provient de nombreuses publications et fonds d'archives, notamment des archives de l'université de Toulouse, des archives municipales, départementales et nationales, du fonds Zaharoff de l'Institut d'Alembert (Paris), et des archives de l'Académie des sciences.

L'auteur remercie chaleureusement Michel Grossetti pour la préface, Caroline Barrera et Olivier Darrigol pour leur relecture attentive du manuscrit, ainsi que, pour leur aide, Stéphan Astier, Pierre Crausse, Emmanuel Davoust, Denis Guthleben, André Nos et Muriel Sabater. L'auteur remercie également, pour leur soutien à la publication, l'ENSEEIH, son fonds de dotation N7DEV et son amicale des ingénieurs AIN7, l'université de Toulouse, la délégation régionale du CNRS, ainsi que les laboratoires IMFT, IRIT, LAAS et LAPLACE.

Chapitre 1

L'électricité, un monde nouveau

Ce n'est ni à la vapeur d'eau ou autres liquides, ni à l'air comprimé ou autres gaz élastiques, ni aux mélanges explosifs susceptibles de produire une action mécanique, que Robur a demandé la puissance nécessaire à soutenir et à mouvoir son appareil. C'est à l'électricité, cet agent qui sera, un jour, l'âme du monde industriel.

Jules Verne, *Robur le Conquérant*, 1886

Les phénomènes électriques et magnétiques découverts dans les laboratoires au cours du XIX^e siècle se révèlent d'une profonde et étonnante diversité. Une floraison d'inventions spectaculaires s'ensuit, de la télégraphie à l'éclairage et du moteur électrique à la radiophonie, inventions dont s'emparent tant l'industrie que l'imagination et les arts. Les modes de vie s'en trouvent bouleversés tandis que se lèvent de grands espoirs de progrès technique, économique et social.

C'est dans ce contexte que naissent, dans la première décennie du XX^e siècle, les instituts électrotechniques des facultés des sciences, contexte que ce premier chapitre se propose de situer. On y rappelle d'abord un événement dont le retentissement fut considérable : l'Exposition internationale d'électricité de 1881, à Paris, associée à un congrès scientifique marquant (§ 1.1). On donne ensuite un aperçu de l'histoire scientifique et technique de l'électricité (§ 1.2) puis de l'électrification de la France et de l'essor de l'hydroélectricité – laquelle jouera un rôle majeur dans l'essor de l'institut électrotechnique de Toulouse (§ 1.3). On expose enfin l'évolution des enjeux dans l'entre-deux-guerres. Le chapitre se conclut par quelques lignes sur la nouvelle physique née au tournant du siècle et sur l'avènement de l'électronique (§ 1.4).

1.1. L'Exposition internationale d'électricité de 1881

L'organisation à Paris, en 1881, d'une exposition internationale d'électricité, première du genre, témoigne de l'importance prise par l'électricité et ses applications dans les milieux scientifiques et industriels, et au-delà dans l'ensemble de la société¹. Au cours des deux ou trois décennies précédentes, l'électricité est en effet sortie des recherches de laboratoire, des expérimentations d'atelier et des divertissements de salon ; elle a engendré de multiples petites industries et conquis un large public qui s'approprie avec enthousiasme ses « applications », en voie de bouleverser la vie quotidienne : télégraphe, éclairage, téléphone, usages médicaux, moteurs (qui meuvent fiacres et tramways, ascenseurs, machines à coudre, etc.), ou revêtement métallique d'objets par galvanoplastie². Le journaliste et écrivain Henri de Parville en témoigne :

Chaque science se partage à tour de rôle la faveur publique. Depuis quelque temps, c'est l'électricité qui règne dans l'opinion, en attendant qu'elle gouverne. Tout le monde a les yeux tournés vers cette branche attrayante de la physique ; elle a la vogue ; aujourd'hui ce qui est électrique, a sans conteste, le don d'attirer l'attention. Aussi bien du reste, la curiosité est justifiée ; les découvertes les plus saillantes, les inventeurs les plus extraordinaires sont, en effet, du domaine de l'électricité³.

Un milieu d'« électriciens » a émergé, composé d'entrepreneurs et de savants bien introduits dans les milieux politiques. Leur organe d'expression privilégié est la revue bimensuelle *La Lumière électrique*, fondée en 1879 par le physicien Théodose du Moncel et par l'homme d'affaires et médecin Cornelius Herz⁴. Éclectique, à

¹ Cardot (1991).

² La galvanoplastie est un procédé de déposition, par électrolyse, d'un revêtement métallique (or, argent, etc.) sur des objets faisant office de cathode. Un service de vaisselle commandé par Napoléon III à la maison Christofle, détentrice de brevets de dorure et d'argenture électrolytiques, est resté célèbre.

³ de Parville (1883, p. 1-2).

⁴ Nio (2020, chap. 10). La revue *La Lumière Électrique* sera renommée *L'Éclairage Électrique* puis deviendra en 1917 la *Revue*

l'image du cercle de ses fondateurs, cette revue s'adresse tant aux savants qu'aux industriels, ainsi qu'à tous les banquiers, journalistes et hommes politiques intéressés par l'électricité.

Soucieux du rayonnement de leur discipline, ces électriciens sollicitent donc l'aide de l'État pour l'organisation d'une exposition internationale à laquelle serait associé un congrès scientifique. Leur argumentation invoque les multiples bénéfices attendus de cette manifestation, tant pour la science que pour l'industrie et le prestige de la France. Le ministre des Postes et Télégraphes, Adolphe Cochery (qui a fondé deux ans auparavant l'École supérieure de télégraphie), se fait l'ambassadeur de l'initiative auprès du Président de la République :

Des découvertes importantes et inattendues ont récemment appelé d'une façon particulière l'attention publique sur tout ce qui concerne l'électricité ; en même temps, l'industrie, s'emparant de ces conquêtes de la science, a depuis quelques années multiplié leurs applications dans toutes les branches. [...] Il y aurait grand intérêt à préciser l'état de la science électrique et de ses applications, à rapprocher et à comparer les procédés de recherche. [...]

Les expositions internationales et les congrès scientifiques qui les complètent si utilement ont permis de montrer les applications pratiques à côté de la théorie. C'est ce qui conduit à vous proposer de réunir un congrès international d'électriciens et d'autoriser simultanément une exposition internationale d'électricité, qui sera, pour ainsi dire, le laboratoire du Congrès. [...]

Le Congrès convoqué par le gouvernement français appellera à Paris les électriciens les plus illustres. [...] Les nations étrangères conviées par la France [...] sauront gré au gouvernement de la République française de s'être fait le promoteur d'une manifestation dont l'opportunité ne paraît pas contestable⁵.

Générale de l'Électricité, titre qu'elle conservera jusqu'à sa disparition en 1995.

⁵ *Catalogue général officiel de l'exposition* cité par Cardot (1991, p. 23) ; repris par J. Turgan, *Exposition internationale d'électricité*, in *(Les Grandes Usines, Calmann-Lévy (1882), vol. 14, <http://cnum.cnam.fr/CGI/fpage.cgi?4KY15.14/171/100/324/13/298>*.

L'accord est obtenu, une commission d'organisation est constituée. Celle-ci, présidée par le ministre des Postes et Télégraphes, rassemble des personnalités de tous horizons : savants, inventeurs, ingénieurs, industriels, représentants des chemins de fer, financiers, journalistes et responsables politiques. Les plus hautes éminences scientifiques sont là, tels les physiciens Edmond Becquerel, Éleuthère Mascart et Jules Jamin, les chimistes Jean-Baptiste Dumas et Marcelin Berthelot, ainsi que de nombreuses personnalités étrangères.

L'Exposition est inaugurée le 1^{er} août 1881 au Palais de l'Industrie (Figure 1.1). Toutes les inventions du siècle sont là : moteurs de Pixii et de Jacobi, machine de Gramme,



Figure 1.1 Le phare de l'Exposition internationale de l'électricité de 1881 ; sa lampe à arc est alimentée par une génératrice Gramme (*L'Illustration* n° 2010, 3 sept. 1881).

bougie d'éclairage à arc Jablochhoff, ampoules à incandescence Edison, téléphone de Bell, etc. La curiosité du public est comblée, de même que l'intérêt d'industriels en quête de nouveaux marchés dans un contexte de plus en plus concurrentiel. Les réseaux de distribution n'existant pas encore, l'énergie électrique est produite sur place par des génératrices construites par l'industriel Hippolyte Fontaine, président-fondateur de la jeune Chambre syndicale de l'électricité. Le succès de l'événement est considérable, au point d'être considéré par ses contemporains comme « un des événements scientifiques les plus importants du dix-neuvième siècle ». La presse s'enthousiasme, ainsi qu'en témoigne le quotidien républicain *Le Temps* :

En rentrant dans le Palais des Champs-Élysées devenu le Palais de l'Électricité, la plupart des gens – Parisiens, mondains, curieuses – éprouvent une impression toute particulière. Ils se trouvent tout à coup en face d'un monde nouveau. C'est l'inconnu. C'est l'au-delà ? Cela se touche et cela, pourtant, ne se devine pas. Ces phares, ces engins, ces instruments de précision, ces bobines, ces machines magnéto ou dynamo-électriques, ces télégraphes-signaux aux disques de couleur, d'un ton cru, jaune d'ocre ou vermillon, ces fils télégraphiques, ces tintements rapides et grêles de sonneries invisibles, ces écussons, ces drapeaux, ces installations de nationalités diverses donnent à la grande nef du Palais quelque chose d'américain, de yankee, de chinois. C'est le triomphe même de la science⁶.

Au moment où la lampe à incandescence s'apprête à conquérir l'espace urbain et domestique, c'est l'éclairage qui suscite les éloges les plus lyriques :

C'était le soir qu'il était préférable d'entrer pour la première fois à l'Exposition. Si l'on n'avait su d'avance où se trouvait le Palais, on l'aurait bien vite deviné à la lueur qu'il projetait au loin sur la ville. On aurait dit que le feu était aux Champs-Élysées ou qu'une magnifique aurore boréale resplendissait à l'occident. La lumière s'échappait par les plafonds vitrés et allait éclairer les nuages. Deux puissants foyers électriques munis de réflecteurs et installés au sommet du portail

⁶ *Le Temps*, 21 août 1881, cité par Cardot (1991, p. 26).

de la porte d'honneur envoient leurs sillons étincelants sur l'Arc de Triomphe et la place de la Concorde⁷.

Les savants conduisent des conférences-promenades entre les stands de l'exposition, fréquentées « même par des femmes », et offrent des conférences publiques dans la salle de réunion du congrès.

Le congrès international. Le congrès lui-même réunit 250 délégués venus de 26 pays⁸. Parmi les membres français, désignés par le ministère, dominent les savants et les ingénieurs de l'État (Télégraphes, Chemins de fer), suivis par des industriels et inventeurs tels Louis Breguet et Marcel Deprez. Les participants étrangers sont surtout des scientifiques, parmi les plus illustres : Hermann Helmholtz, William Thomson et Gilbert Govi, élus vice-présidents étrangers du congrès (un Allemand, un Anglais, un Italien), ainsi que, entre autres, Rudolf Clausius, Gustav Kirchhoff, Ernst Mach et Werner Siemens.

Les questions débattues portent notamment sur l'internationalisation des lignes télégraphiques, les paratonnerres, les courants appropriés aux pratiques médicales, la mesure de l'intensité lumineuse des lampes, le transport de « la force électrique », et les unités électriques. Sur la dernière question, majeure, s'affrontent les points de vue différents des théoriciens et des expérimentateurs, ainsi que des intérêts nationaux concurrents. Un accord est finalement trouvé au terme d'âpres discussions, accord dont se félicite, dans son discours de clôture, Jean-Baptiste Dumas, secrétaire perpétuel de l'Académie des sciences et membre de l'Académie française :

L'accord s'est fait, et, par une décision unanime, vous avez rattaché d'une part les mesures électriques absolues au système métrique, en adoptant pour base le centimètre, la masse du gramme, et la seconde ; de l'autre, vous avez institué des unités usuelles [...] et vous les avez rattachées par des liens étroits aux unités absolues. Le système est complet [...] et désormais les noms de Coulomb, de Volta, d'Ampère, de Ohm et de Faraday demeureront étroitement liés aux

⁷ Henri de Parville, cité par Cardot (1991, p. 26).

⁸ Cardot (1991) ; Blondel (1990).

applications journalières des doctrines dont ils furent les heureux créateurs⁹.

Deux autres unités, le joule et le watt, seront adoptées en 1889 lors du deuxième congrès international d'électricité, organisé à Paris conjointement à l'Exposition universelle.

La Société internationale des électriciens. Des suites du congrès et à l'instigation de Dumas, naît en 1883 une Société internationale des électriciens qui réunit scientifiques et industriels. Tirillée dans les années suivantes par des intérêts industriels et commerciaux divergents, attisés par les nationalismes, cette société est progressivement désertée par ses membres non français et se transforme bientôt en Société française des électriciens. Quant à l'industrie nationale, elle manifeste déjà des faiblesses par rapport à la concurrence étrangère, ainsi que l'indique Théodose du Moncel au sortir de l'exposition :

Mais hélas ! On sait très bien que le nombre de vrais électriciens est chez nous très restreint [...]. En Angleterre, il n'en est pas de même, car depuis 1850 il s'est créé une branche considérable d'industrie basée sur l'électricité [...], celle des câbles sous-marins [...]. En France, aucune grande industrie électrique n'a été établie en dehors de la galvanoplastie, et, bien que nous ayons des constructeurs très habiles pour les appareils télégraphiques et pour les instruments de physique électrique, nous n'avons pas encore chez nous de ces grandes usines électriques comme celles de MM. Siemens et Felten en Allemagne et celles des différentes compagnies anglaises pour la construction des câbles sous-marins¹⁰.

Le Laboratoire central d'électricité. Les bénéfiques financiers de l'exposition, inattendus et importants, vont être employés, à l'initiative de la Société des électriciens, à la création à Paris d'un Laboratoire central d'électricité¹¹. Les missions de ce laboratoire seraient, en particulier,

⁹ J.-B. Dumas, cité par Cardot (1991, p. 31). Voir également Janet (1909).

¹⁰ Th. Du Moncel, cité par Cardot (1991, p. 32-33).

¹¹ Grelon (1991a, p. 286).

les essais et le contrôle des appareils de mesure industriels et la diffusion de l'usage effectif des unités récemment adoptées. Créé par décret en 1882, le laboratoire tarde cependant à devenir réalité, jusqu'à ce qu'Éleuthère Mascart, éminente figure académique et homme de réseaux, prenne la direction des opérations¹². Le laboratoire ouvre ses portes en 1888. Mascart en préside la commission administrative. En 1894, une école est fondée au sein du laboratoire, avec l'appui du Syndicat des électriciens, afin d'offrir aux ingénieurs déjà diplômés une formation complémentaire en électricité. Mascart fait alors appel à un jeune et brillant physicien, Paul Janet, pour diriger l'ensemble du laboratoire et de son école d'application (cf. chap. 2).

1.2. De la pile de Volta à l'électron

Succédant à un xviii^e siècle fasciné par les triomphes de la mécanique newtonienne, le xix^e siècle est celui d'un foisonnement de découvertes dans tous les domaines de la physique – optique, électricité, magnétisme, thermodynamique – associé à un essor tout aussi important de la chimie¹³. Les phénomènes observés dans ces domaines très divers font apparaître des correspondances laissant deviner une profonde unité sous-jacente. L'idée se précise ainsi de l'existence d'une certaine grandeur, qui prend le nom d'énergie, se conservant dans toute évolution d'un système physique, conservation que Hermann

¹² Éleuthère Mascart (1837-1908), ancien élève de l'ENS et agrégé de sciences physiques et naturelles (1861), soutient en 1864 une thèse sur le rayonnement solaire ultra-violet. Après quatre années d'enseignement en lycée, il est nommé suppléant puis titulaire de la chaire de physique générale et expérimentale du Collège de France (1872-1908), où il succède à Victor Regnault. Premier directeur du Bureau central météorologique (1878-1906), il fait installer une station météorologique au sommet de la tour Eiffel (1889), puis préside l'Organisation météorologique internationale (1896-1907). Il est élu membre de l'Académie des sciences en 1884. Homme d'influence et de réseaux, il concrétise en 1888 la fondation du Laboratoire central d'électricité puis crée en 1894 l'École supérieure d'électricité (Janet, 1909).

¹³ Taton (1981, p. 159-340) ; Hunt (2010).

Helmholtz (1821-1894) et William Thomson (1824-1907, futur Lord Kelvin) érigent en principe général. La synthèse entre électricité et magnétisme que réalise James Clerk Maxwell (1831-1879) dans les années 1860 offre une autre confirmation de l'unité de la nature. Cette section présente un bref panorama de l'histoire de l'électricité jusqu'au seuil de la révolution quantique et relativiste du début du xx^e siècle, en tentant de rendre compte des liens étroits qui associent alors progrès scientifiques et progrès techniques¹⁴.

1.2.1. De Volta à Maxwell et Hertz

De l'électrostatique à la pile de Volta. On connaît depuis l'Antiquité la propriété que possèdent certains corps, tel le verre ou l'ambre, frottés avec de la laine, d'attirer ou de repousser de petits morceaux de papier ou brins de paille. Les propriétés d'attraction ou de répulsion de la magnétite, minéral présent dans de nombreuses roches, sont également connues. À la fin du xviii^e siècle, les deux espèces d'électricité, positive et négative, ont été identifiées et matériaux isolants et conducteurs sont distingués. La bouteille de Leyde, premier « condensateur », permet de mesurer les quantités d'électricité. Charles Augustin Coulomb (1736-1806) a établi que la force entre deux corps chargés est inversement proportionnelle au carré de leur distance, loi dont on ne manque pas de remarquer l'analogie avec la loi d'attraction gravitationnelle de Newton. Cette loi de Coulomb a été découverte indépendamment par le chimiste et physicien anglais Henry Cavendish (1731-1810) qui a par ailleurs clarifié la notion de capacité d'un condensateur. La notion de potentiel électrique est formalisée par Pierre-Simon de Laplace (1749-1827) qui en établit l'équation fondamentale dans le vide, équation généralisée en 1812 par Siméon-Denis Poisson (1781-1840) aux milieux incluant des particules chargées. Les fondements de l'électrostatique apparaissent alors bien établis.

De nouvelles perspectives se dessinent à la fin du xviii^e siècle avec Luigi Galvani (1737-1798), professeur d'anatomie à l'université de Bologne, et ses fameuses

¹⁴ Pour une véritable histoire de l'électricité, voir Whittaker (1951, 1953) ; Heilbron (1979) ; Bauer (1981) ; Darrigol (2000) ; Hunt (2010).

observations des contractions de cuisses de grenouilles attachées à un grillage de fer par des crochets de cuivre, et touchées par la pointe d'un scalpel. Les « courants galvaniques » ainsi mis en évidence inspirent à Alessandro Volta (1745-1827), professeur de physique à l'université de Pavie, une découverte majeure : la mise en contact de deux métaux différents (du cuivre et du zinc par exemple) fait apparaître entre ces métaux une différence de potentiel électrique, laquelle engendre un courant permanent dans un fil métallique fermant le circuit. La tension électrique ainsi produite est faible, mais l'empilement de plusieurs couples de disques métalliques, entre lesquels sont interposées des pièces de tissu (ou de carton) imbibées d'acide, permet d'élever cette tension à volonté. La « pile électrique » naît ainsi en 1800. Elle suscite d'emblée l'admiration de ses contemporains, au point d'être jugée par le physicien et astronome François Arago (1786-1853) comme « le plus merveilleux instrument que les hommes aient jamais inventé »¹⁵.

L'électrolyse. L'invention de Volta ouvre de nouveaux horizons aux études sur l'électricité. Les tensions obtenues, proportionnelles au nombre de disques empilés, s'élèvent bientôt à plusieurs centaines de volts. L'intensité du courant atteint la dizaine d'ampères, et permet de délivrer des puissances supérieures de plusieurs ordres de grandeur à celles des machines électrostatiques. L'exploration des effets du passage du courant électrique dans diverses substances découvre une foule de phénomènes, à commencer par l'électrolyse – séparation des constituants d'une solution aqueuse par le passage d'un courant entre deux électrodes. Quelques semaines après l'invention de Volta, deux chimistes britanniques décomposent ainsi l'eau en oxygène et hydrogène. L'électrolyse de solutions salines fait apparaître de nouveaux éléments chimiques. Humphry Davy (1778-1829), à la *Royal Institution* de Londres, isole ainsi le calcium, le sodium et le potassium, tandis que son assistant Michael Faraday (1791-1867) établit les lois quantitatives de l'électrolyse.

L'induction électromagnétique. Un nouveau phénomène majeur est découvert en 1820 par Hans Christian Ørsted (1777-1851), professeur à l'université de Copenhague : un

¹⁵ Segré (1987, p. 149).

courant électrique dévie une aiguille aimantée placée dans son voisinage – l'aiguille s'oriente perpendiculairement au courant. Ce phénomène, qui montre qu'électricité et magnétisme sont liés, est présenté à l'Académie des sciences de Paris par Arago. André-Marie Ampère (1775-1836) s'engage alors dans l'exploration systématique des relations entre phénomènes électriques et magnétiques. Ses observations, très complètes, lui permettent de poser les fondations d'une théorie mathématique de l'électrodynamique. Ampère, qualifié par Maxwell de « Newton de l'électricité »¹⁶ et atomiste convaincu, explique également le magnétisme de la matière en considérant que chaque molécule contient une boucle de courant permanente et interprète l'aimantation macroscopique comme le résultat de l'orientation des boucles de courant sous l'action d'un champ magnétique extérieur.

Un an après la découverte d'Ørsted, Faraday met en évidence le phénomène réciproque : une tige parcourue par un courant et placée au voisinage du pôle d'un aimant tourne autour de cet aimant : c'est le premier moteur électrique. Faraday, relieur de son premier métier, recruté par Davy comme assistant, se révèle un expérimentateur d'une imagination et d'une ingéniosité prodigieuses, doublé de la qualité de brillant conférencier. Ses découvertes portent sur des domaines très variés touchant à la métallurgie, l'optique, l'électricité, le magnétisme (il découvre le diamagnétisme), la chimie, la liquéfaction des gaz, et l'électrolyse. Il développe également l'idée de « lignes de force magnétiques » caractérisant l'état du « champ » au voisinage d'aimants, de charges électriques ou de courants, lignes qu'il visualise avec de la limaille de fer.

Convaincu d'une profonde unité des phénomènes naturels, Faraday est par ailleurs persuadé que si un courant électrique engendre un champ magnétique dans son voisinage, comme l'a montré Ørsted, alors un champ magnétique doit créer un effet électrique. Il parvient à le démontrer en 1831, mais le phénomène est ici plus subtil : seul un *déplacement* du conducteur ou une *variation* du champ magnétique engendre une « force électromotrice » – cause de courant – dans le conducteur : c'est l'induction électromagnétique, qui sera au fondement de la technique des générateurs et des moteurs électriques.

¹⁶ Darrigol (2000, § 1.4.2).

La théorie électromagnétique de Maxwell. Les travaux de Faraday et Thomson inspirent à Maxwell sa grande synthèse de l'électricité, du magnétisme et de l'optique, publiée en 1873 dans un *Traité d'électricité et de magnétisme*. Guidé par des analogies mécaniques, Maxwell – alors premier titulaire de la chaire Cavendish de l'université de Cambridge – y interprète la lumière et les phénomènes électriques et magnétiques comme des états physiques d'un même milieu, un « éther » hypothétique, siège de quatre champs de vecteurs en interaction : les champs électrique et magnétique, et les champs de polarisation associés¹⁷. Le traité, de lecture ardue, ne diffuse que lentement dans la communauté scientifique mais plusieurs physiciens britanniques, ainsi que Helmholtz et Heinrich Hertz (1857-1894) en Allemagne et Henri Poincaré (1854-1912) en France, en saisissent toute la portée.

Les ondes hertziennes. La théorie de Maxwell trouve une confirmation magistrale en 1888 avec la mise en évidence expérimentale des ondes électromagnétiques par Hertz, ancien assistant de Helmholtz et professeur à Karlsruhe¹⁸. L'émetteur de Hertz est constitué de deux sphères (ou plaques) métalliques reliées par une tige de cuivre coupée en son milieu. Les sphères jouent le rôle d'une capacité et le fil celui d'une inductance. Une bobine de Ruhmkorff charge les sphères jusqu'à ce qu'une étincelle éclate dans la coupure de la tige, amorçant ainsi la décharge oscillante des sphères à travers la tige. Les ondes émises par la décharge oscillante sont détectées par un circuit récepteur essentiellement constitué d'un anneau métallique ouvert, distant de quelques mètres. Traversé par l'onde, cet anneau est le siège d'un courant se manifestant par de petites étincelles jaillissant de son ouverture. L'émission est transitoire – elle dure le temps de la décharge – mais le processus peut être répété à volonté. Hertz met en évidence les propriétés optiques des ondes électromagnétiques (leur longueur d'onde, de l'ordre du mètre, est très supérieure aux longueurs d'onde de la lumière visible).

¹⁷ Notons que Maxwell est aussi, avec Clausius, Gibbs et Boltzmann, un des fondateurs de la théorie cinétique des gaz et de la mécanique statistique.

¹⁸ Whittaker (1951, chap. X) ; Darrigol (2000, § 6.4-6.5) ; Hunt (2010, chap. 4).

Il découvre également, en passant, que la lumière ultraviolette émise par l'étincelle primaire agit sur la production des étincelles : c'est l'effet photoélectrique.

1.2.2. Une floraison d'applications

Les découvertes de laboratoire trouvent rapidement de nombreuses applications, stimulées par la mise au point à la fin des années 1860 de génératrices de courant à caractère industriel et par le déploiement des premiers réseaux de distribution. Les usages de l'électricité, dont on donne ici un aperçu, se diversifient alors considérablement, tant dans la vie domestique que dans l'industrie¹⁹.

La télégraphie. La télégraphie électrique, technique de communication par signaux électriques, est la première application de l'électricité à l'origine d'une industrie et d'une organisation à grande échelle, nationale puis transnationale²⁰. Aux premiers télégraphes électrostatiques, se substituent dans les années 1820 des systèmes électromagnétiques, où les impulsions envoyées sur les fils sont détectées par la déviation d'aiguilles aimantées. La technique est développée notamment par Charles Wheatstone en Angleterre et Samuel Morse aux États-Unis – Morse invente son fameux code de points et traits.

En 1850, les réseaux de télégraphes constituent un « système nerveux » s'étendant sur des dizaines de milliers de kilomètres, transmettant informations commerciales, journalistiques et météorologiques. Un câble sous-marin traverse la Manche en 1851 et, quinze ans plus tard, un câble transatlantique est opérationnel. William Thomson puis Oliver Heaviside établissent la théorie de la propagation télégraphique, résolvant notamment les questions du retard des signaux et de leur dispersion selon leur fréquence. Une nouvelle industrie éclôt, dominée par les compagnies anglaises – dont celle, florissante, de Thomson. En France, une administration spécifique d'inspecteurs des Télégraphes est créée par le Second Empire, qui organise un réseau de lignes couvrant tout le territoire national.

¹⁹ Daumas (1996, t. 4, deuxième partie) ; Borvon (2009) ; Blondel & Wolff (2009).

²⁰ Hunt (2010, p. 79-93).

L'éclairage. L'éclairage électrique, application la plus spectaculaire de l'électricité, est initialement produit par des « lampes à arc » – où la lumière est issue de l'ionisation de l'air entre deux électrodes (Léon Foucault, Paul Jablochhoff)²¹. À la fin des années 1870, apparaît la lampe à incandescence, plus douce, à filament de carbone puis à filament métallique (Joseph Swan, Thomas Edison).

Ces lampes sont en général alimentées par des piles de Volta, progressivement améliorées depuis leur invention en 1800. L'accumulateur au plomb, rechargeable, représente une innovation notable mise au point à la fin des années 1850 par Gaston Planté, collaborateur d'Edmond Becquerel au Conservatoire national des arts et métiers. Piles et accumulateurs ont cependant une durée de fonctionnement limitée à quelques heures, et sont encombrants et malcommodes – les sous-sols de l'Opéra Garnier, à Paris, tôt converti à l'éclairage électrique, sont remplis d'accumulateurs et empestent l'acide. L'installation, dès les années 1880, de réseaux de distribution rayonnant à partir de génératrices thermiques ou hydrauliques, résout ces problèmes et favorise une extension rapide de l'éclairage électrique.

Électrochimie et électrometallurgie. La découverte de l'électrolyse engendre le développement de l'électrochimie, première application industrielle de l'électricité. Sont ainsi isolés et produits à grande échelle des gaz tels que l'oxygène et le chlore, lesquels participent à l'élaboration de produits chimiques tels que les chlorates pour la fabrication des engrais et des explosifs.

La galvanoplastie, technique issue de l'électrolyse, permet le dépôt de métaux en couches minces. Plus généralement, l'électrometallurgie permet l'élaboration de métaux purs (aluminium, magnésium, sodium) et d'alliages métalliques (ferro-alliages, aciers). Les fours à arc sont de plus en plus utilisés pour les traitements thermiques de ces métaux. Ces fours permettent également le développement d'une chimie à haute température, par exemple pour la synthèse du carbure de calcium et de l'acide nitrique.

²¹ Hunt (2010, chap. 6).

L'électrochimie et l'électrometallurgie, gourmandes en électricité, se développent préférentiellement au voisinage des lieux de production de l'hydroélectricité, en particulier dans la région de Grenoble.

Moteurs et génératrices. La découverte de l'induction électromagnétique par Faraday, en 1831, engage rapidement physiciens et inventeurs dans la construction de génératrices magnéto-électriques²². Le fabricant d'instruments Hippolyte Pixii conçoit ainsi, dès l'année suivante, et en collaboration avec Ampère, une première génératrice constituée d'un aimant en U placé devant une bobine fixe et entraîné en rotation par une manivelle (Figure 1.2a). Le courant alternatif délivré par cette « magnéto » est transformé en courant continu par un commutateur monté sur l'axe de rotation de l'aimant et inversant le sens du courant à chaque demi-tour – on ne conçoit alors d'utilisation de l'électricité qu'à partir de courants continus. Une variante de la machine laisse fixes les aimants inducteurs (pièces les plus lourdes, constituant désormais « le stator ») et fait tourner la bobine du « rotor » (ou « induit »).

Trois décennies d'améliorations seront nécessaires pour obtenir des machines utilisables à l'échelle industrielle et économiquement viables. La compagnie française *l'Alliance* conquiert les premiers marchés dans les années 1860 : ses magnétos alimentent les cuves pour la galvanoplastie de l'orfèvrerie Christofle ainsi que les lampes à arc des phares maritimes. Ces machines sont cependant très lourdes – plusieurs tonnes – et leur rendement reste faible. L'ingénieur allemand Werner Siemens remplace les aimants permanents du stator par des électro-aimants, beaucoup plus légers, dont les pièces polaires semi-circulaires enveloppent au plus près les bobines du rotor (comme sur la machine représentée sur la Figure 1.2b). On réalise par ailleurs que ces électroaimants peuvent être excités par le courant produit par la bobine, sans nécessiter de génératrice d'appoint (excitatrice). Le physicien italien Antonio Pacinotti conçoit, pour le rotor, un bobinage astucieux délivrant un courant continu presque constant (Figure 1.3a). L'anneau bobiné de Pacinotti sera

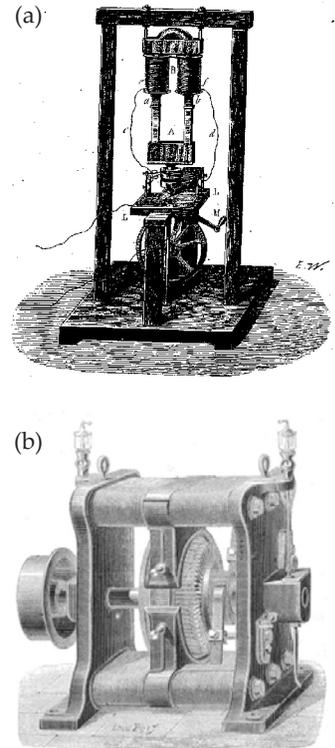


Figure 1.2 (a) Machine de Pixii (1832) : l'aimant tournant A engendre un courant alternatif dans les bobines B, redressé en courant continu par un commutateur mis au point par Ampère. (b) Dynamo Gramme destinée à l'éclairage à arc : l'anneau bobiné constituant le rotor, entraîné par la poulie à gauche, tourne à l'intérieur des deux pièces polaires, semi-circulaires, de l'électro-aimant (Blondel & Wolff, 2009).

²² Rocard (1951, chap. IV.V et chap. V.III) ; Ramunni (1991b) ; Blondel & Wolff (2009) ; Hunt (2010, chap. 6).

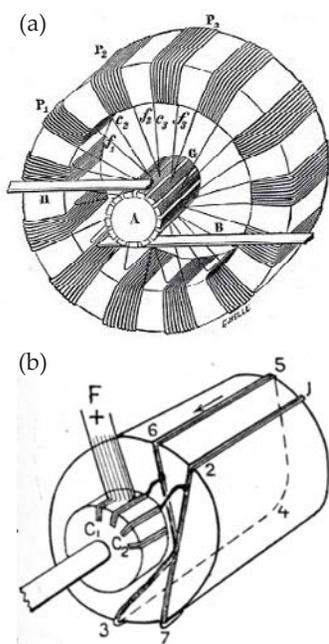


Figure 1.3 (a) Le rotor de la dynamo de Pacinotti-Gramme est constitué de bobines montées en série sur un anneau de fer doux ; chaque connexion entre bobines adjacentes est reliée à la lame d'un collecteur sur lequel frottent deux balais, lesquels recueillent alors un courant continu presque constant (Blondel & Wolff, 2009) ; (b) meilleure conception d'un rotor bobiné en tambour (conducteurs bobinés dans le sens 1-2-3-4-5-6-7...) (Rocard, 1951, p. 210).

par la suite avantageusement remplacé par un tambour bobiné supprimant la partie interne, inactive, des bobines (Figure 1.3b).

Zénobe Gramme, inventeur autodidacte belge installé à Paris²³, réalise une synthèse des innovations de Siemens et Pacinotti, et dépose des brevets – Pacinotti n'a pas déposé de brevet ni cherché de relais industriel. La « machine de Gramme » (Figure 1.2b) peut, comme toute dynamo, fonctionner comme génératrice de courant ou comme moteur : elle est réversible. Fabriquée en association avec l'industriel Hippolyte Fontaine, elle fait sensation sur les stands d'exposition et connaît un grand succès commercial, national et international. La qualité des aimants progresse : les aimants feuilletés conçus par Jamin (tôles de fer ou d'acier empilées et isolées les unes des autres par un vernis) permettent d'obtenir des aimantations plus fortes et limitent les courants de Foucault (courants induits néfastes, dissipés par effet Joule). L'électricité peut désormais être produite à l'échelle industrielle, à partir de moteurs thermiques ou de turbines hydrauliques.

Le moteur à courant alternatif, breveté en 1888 par Nikola Tesla (1856-1943), savant et ingénieur croate émigré aux États-Unis, va permettre une utilisation directe du courant alternatif nativement produit par les génératrices (avant son redressement par un commutateur). Le fonctionnement de ce moteur repose sur la création, par des électro-aimants alimentés par des courants alternatifs déphasés, d'un champ magnétique tournant. L'aimant permanent du rotor tend alors à s'aligner avec la direction du champ tournant et tourne donc avec lui (comme l'aiguille d'une boussole tend à s'aligner avec le champ magnétique terrestre). Le moteur ainsi réalisé est dit « synchrone » car sa vitesse de rotation est imposée par

²³ Zénobe Gramme (1826-1901), né en Belgique, s'installe à Paris en 1856 et travaille comme menuisier pour la compagnie *l'Alliance* qui fabrique des magnétos (notamment pour l'orfèvrerie Christofle utilisatrice de galvanoplastie). Esprit inventif, Gramme brevète à partir de 1868 plusieurs améliorations de la dynamo. Il s'associe alors à l'industriel Hippolyte Fontaine avec lequel il fonde la Société des machines magnétoélectriques Gramme. Officier de la Légion d'honneur (1877), lauréat du prix Volta de l'Académie des sciences (1888), et Commandeur de l'Ordre de Léopold (1898).

celle du champ magnétique tournant – le couple résistant sur l'arbre du rotor déterminant le retard de la phase du rotor. Dans une autre version, le rotor est constitué non plus par un aimant permanent mais par un tambour bobiné ; les courants induits par le champ tournant engendrent sur les conducteurs du tambour une force de Laplace qui fait tourner le rotor. La vitesse de rotation de ce moteur n'est alors plus imposée par le champ tournant mais s'ajuste au couple résistant. Ce moteur, dit « asynchrone », a l'avantage de démarrer seul, sans l'assistance d'un dispositif auxiliaire de lancement.

La machine de Tesla est réversible, comme celle de Gramme : lorsqu'on entraîne mécaniquement son rotor, des courants alternatifs apparaissent par induction dans les bobines du stator, réalisant ainsi un « alternateur ». La mise en œuvre de courants triphasés et le branchement des bobines en étoile ou en triangle, autorisent divers types de fonctionnement. Les « commutatrices », notamment, permettent de transformer un courant alternatif en courant continu pour l'alimentation des moteurs de traction ferroviaire²⁴.

Véhicules électriques. L'apparition des moteurs électriques engendre une révolution dans les modes de transport. Le tramway à traction électrique, réalisation de Siemens, fait son apparition à l'Exposition internationale d'électricité de 1881. Les véhicules autonomes sur batterie rechargeable prennent leur essor dans les années suivantes et voient leurs performances – vitesse, autonomie, fiabilité – s'améliorer rapidement. La célèbre *Jamais-Contente*, munie de pneus Michelin, franchit ainsi en 1899 le seuil des 100 kilomètres par heure (Figure 1.4). Les véhicules électriques, techniquement au point, représentent en 1905 près de la moitié du parc automobile mondial. Leurs avantages sur ceux à moteur thermique sont la fiabilité, le silence et l'absence de pollution – les grandes villes sont alors asphyxiées par les fumées de charbon. Leur développement est cependant freiné par la faible densité du réseau de distribution de l'électricité. Cette entrave, conjuguée au progrès des moteurs à combustion interne

²⁴ Pour une description plus complète des machines tournantes à courant alternatif, voir e.g. Rocard (1951, chap. V.III) ; Daumas (1996, t. 4, partie 2, chap. III).

Figure 1.4 La chanteuse Florelle et sa Jamais-Contente, premier véhicule électrique à dépasser, en 1900, la vitesse de 100 km/h.



et au faible coût du pétrole – le marché américain est alors tiré par la fameuse Ford T –, entraîne dès les années 1910 un recul relatif de la traction électrique²⁵.

La télégraphie sans fil (TSF). La portée des ondes de Hertz était limitée à une vingtaine de mètres, du fait, en particulier, de la faible sensibilité du récepteur. Cette sensibilité est bientôt améliorée grâce à un phénomène étudié à partir de 1890 par Édouard Branly²⁶, professeur de physique à l'Institut catholique de Paris : la variation de la conductibilité de la limaille de fer lorsqu'une étincelle est créée dans son voisinage. Mais Branly ne fait pas le lien entre ses observations et les ondes de Hertz. Ce lien est établi en 1892 en Grande-Bretagne, où l'on comprend alors l'utilité du tube à limaille – qui prend le nom de « cohéreur » de Branly – pour la détection des ondes hertziennes. On parvient d'autre part à produire des ondes entretenues – et non plus amorties – dans des postes à arc. Pour la réception, le cohéreur de Branly est progressivement remplacé par divers systèmes plus performants tels que le détecteur à cristal de galène ou la valve de Fleming.

²⁵ Selon Taalbi & Nielsen (2021), la voiture électrique aurait pu s'imposer devant sa concurrente thermique s'il y avait eu en 1902 le réseau de distribution disponible vingt ans plus tard.

²⁶ Blondel (1993).

Ces travaux, où se distingue l'ingénieur italien Guglielmo Marconi, ouvrent la voie à la télégraphie sans fil (TSF) qui se substitue au télégraphe électrique, non sans de sévères batailles de brevets²⁷. L'antenne réceptrice – une longue tige verticale – est introduite en 1894 par le savant russe Alexandre Popov afin d'augmenter la sensibilité du récepteur ; l'antenne émettrice est ajoutée deux ans plus tard par Marconi. La portée des ondes de Marconi, de dix kilomètres en 1896, permet cinq ans plus tard de traverser l'Atlantique, transmettant de brefs textes codés dans l'alphabet Morse. Les premières utilisations portent sur la transmission de données météorologiques, la sécurité des navires en mer et le renseignement militaire.

En France, le développement de la TSF et de ses applications militaires doit beaucoup au général Gustave Ferrié²⁸. Une première liaison sans fil est établie en 1898 par Camille Tissot, officier de marine et professeur à l'École navale, entre l'île d'Ouessant et le phare de Trézien sur le continent. La même année, Eugène Ducretet, fabricant réputé d'instruments scientifiques, établit une liaison entre la tour Eiffel et le Panthéon. La tour accueille en 1910 un service journalier de transmission de l'heure, à l'initiative du Bureau des longitudes.

L'électricité médicale. Discutés dès le xviii^e siècle, les usages médicaux de l'électricité sont relancés par l'invention, en 1800, de la pile de Volta – les trois premières grandes piles sont installées à l'École polytechnique, au Collège de France et à la faculté de médecine de Paris²⁹. L'électrothérapie est instituée comme discipline médicale dans les années 1840 par le médecin Guillaume Duchenne de Boulogne – fondateur de la neurologie française –, mais ne prend véritablement son essor qu'à partir de 1880 sous l'impulsion d'Arsène d'Arsonval, professeur de médecine expérimentale au Collège de France. Elle devient alors une spécialité médicale à part entière, prestigieuse, scientifiquement fondée sur l'électrophysiologie – étude des propriétés électriques des nerfs et des muscles.

²⁷ Aitken (1985) ; de Broglie (1947, chap. xv).

²⁸ Ginoux (2017, p. 39-41).

²⁹ Blondel (2010) ; Darrigol (2023).

Le congrès associé à l'Exposition internationale de l'électricité, en 1881, inclut des séances consacrées à l'électrophysiologie qui rassemblent physiciens, physiologistes et médecins français et étrangers – d'Arsonval, Étienne-Jules Marey, Marcel Deprez, Gabriel Lippman, Emil du Bois-Reymond, Helmholtz. Ceux-ci y discutent des procédures thérapeutiques et des « machines à guérir », appareils dont sont explorées empiriquement les possibilités thérapeutiques : piles électriques, machines électrostatiques, bobines d'induction électromagnétique, dynamo de Gramme, courants alternatifs à haute fréquence. L'électrothérapie participe au progrès des instruments de mesure, en particulier des milliampèremètres, avec l'idée de « doser l'électricité » comme on dose un médicament – le galvanomètre à cadre mobile est une invention de d'Arsonval et Deprez.

Des services d'électricité médicale apparaissent dans les hôpitaux, dont le plus célèbre, fondé en 1875, est celui de la Salpêtrière, ainsi que des chaires de physique médicale dans les facultés et écoles de médecine – notamment à Nancy, Lille et Toulouse. Les bienfaits de l'électricité sont également vantés dans les cabinets privés. Ainsi le docteur Paul Gachet, médecin et ami de Van Gogh, annonce sur son papier à en-tête : « Applications de l'électricité au traitement des maladies chroniques et nerveuses. Au moyen des appareils sortant des ateliers de M. Morin », la dernière indication témoignant du prestige des machines au regard des patients. Édouard Branly, physicien mais aussi médecin, affiche le même type de pratiques dans son cabinet privé. Des appareils d'automédication sont proposés à la vente aux particuliers, notamment par la célèbre Manufacture française d'armes et cycles de Saint-Étienne, pour le traitement des rhumatismes et de certaines maladies chroniques. Selon d'Arsonval, « la thérapeutique de l'avenir n'emploiera comme moyens curatifs que les modificateurs physiques (chaleur, lumière, électricité et autres agents encore inconnus). Les drogues c'est l'empoisonnement³⁰. »

D'Arsonval, professeur suppléant puis titulaire de la chaire de médecine expérimentale au Collège de France, promeut, comme son prédécesseur Claude Bernard, une médecine fondée sur l'expérimentation en laboratoire.

³⁰ Blondel (2010, p. 47).

Une autre école, de médecine clinique, promue par Duchenne de Boulogne puis par Jean-Martin Charcot à la Salpêtrière, s'appuie plutôt sur l'électrothérapie et l'expérimentation statistique sur un grand nombre de patients. Cette médecine s'intéresse plus particulièrement aux troubles neurologiques, spécialité de Charcot.

La découverte en 1895 des rayons X et de leur capacité de visualisation de l'intérieur du corps humain, notamment de son squelette, engendre le développement de la radiologie, nouvelle discipline médicale vite auréolée du prestige que lui confèrent son efficacité diagnostique et son caractère encore mystérieux.

1.2.3. À l'aube d'une nouvelle physique

La révolution de la physique qui survient au début du xx^e siècle est précédée, à la fin des années 1890, par quatre grandes découvertes : l'électron, l'effet Zeeman, les rayons X et la radioactivité³¹. Ces découvertes, qui contribueront à l'attrait et au prestige des formations universitaires en électrotechnique, sont brièvement présentées ici.

L'électron. La découverte de l'électron couronne un ensemble de travaux visant à élucider la nature du courant électrique. Ces travaux portent en particulier sur les électrolytes et sur les décharges entre deux électrodes (cathode et anode) dans un tube de verre vidé de son air – le fameux « tube à décharge » du chimiste anglais William Crookes (Figure 1.5). L'observation la plus étrange est une phosphorescence verte de la région du tube opposée à la cathode, phosphorescence qui semble liée à de mystérieux rayons issus de cette cathode. Ces « rayons cathodiques » sont compris autour de l'année 1895 comme constitués

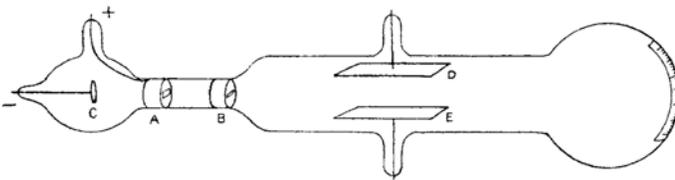


Figure 1.5 Un tube à décharge utilisé par J. J. Thomson (1897) : les électrons émis par la cathode C sont accélérés par les anodes collimatrices A et B ; l'impact du faisceau sur la partie droite du tube est marqué par une tache phosphorescente ; le faisceau peut être dévié par un champ électrique établi entre les plaques D et E, ou par un champ magnétique (d'après Darrigol (2000), p. 309).

³¹ Whittaker (1951, chap. XI) ; Segré (1984, chap. I-VII) ; Darrigol (1998) ; Darrigol (2000, chap. 7-8) ; Lelong (1997).

de corpuscules électrisés très légers, baptisés électrons, constituants universels de la matière – ils sont deux mille fois plus légers que l'atome d'hydrogène, le plus petit des atomes. S'illustrent notamment dans cette découverte les Anglais Arthur Schuster et Joseph John Thomson, les Allemands Philipp Lenard et Emil Wiechert, ainsi que le Français Jean Perrin.

L'effet Zeeman. Une autre grande découverte, appelée à jouer un rôle important dans les futures théories quantiques de l'atome, est la mise en évidence par Pieter Zeeman (1865-1943), en 1895 à Leyde, de l'action d'un champ magnétique sur la lumière émise par un atome. Zeeman observe ainsi un élargissement par le champ magnétique des raies spectrales émises par des atomes de sodium. Hendrick Lorentz (1853-1928) en donne rapidement une interprétation théorique faisant intervenir l'existence d'électrons à l'intérieur des atomes. La découverte vaut aux deux physiciens de partager le prix Nobel en 1902.

Les rayons X. Toujours en 1895, le physicien Wilhelm Röntgen (1845-1923), à Wurtzburg, découvre fortuitement l'existence de mystérieux rayons émis par la région phosphorescente du tube cathodique, capables de traverser la matière et d'impressionner une plaque photographique. Les photographies qu'il obtient du squelette de la main de son épouse (Figure 1.6) ont un retentissement médiatique considérable. La découverte des « rayons X » lui vaut en 1901 le premier prix Nobel de physique. Leur utilisation à des fins de diagnostic médical se développe rapidement, avec la création dans les hôpitaux de services spécialisés d'électro-radiologie. Leur nature – un rayonnement de très courte longueur d'onde – est élucidée en 1912, ouvrant la voie à la spectroscopie X.



Figure 1.6 Squelette de la main de Anna Ludwig, photographiée aux rayons X par son mari Wilhelm Röntgen (1895) (Source : www.nobelprize.org).

La radioactivité. Intrigué par les rayons X de Röntgen, Henri Becquerel (1852-1908), professeur au Muséum d'histoire naturelle, cherche un lien entre ces rayons et la fluorescence dont il est un spécialiste. C'est ainsi qu'il découvre, en 1896, qu'une plaque photographique est impressionnée par des sels d'uranium placés à proximité. De mystérieux rayons sont donc émis par ces sels, sans qu'aucune fluorescence n'entre ici en jeu. Ces rayons rendent par ailleurs conducteurs les gaz qu'ils traversent

(ces gaz sont donc ionisés, mais la notion d'ion n'est pas encore éclaircie). Pierre et Marie Curie, à l'École de physique et chimie de Paris, montrent que le phénomène est lié à l'atome d'uranium lui-même et que d'autres substances contenues dans les minerais naturels, tel le thorium, possèdent des propriétés semblables d'émission spontanée. Au terme d'un travail harassant sur d'énormes quantités de minerai, dans un laboratoire vétuste, Marie Curie (1867-1934) isole ainsi en 1898 deux nouveaux éléments radioactifs, le polonium et le radium. Pour leur découverte de la « radioactivité », Becquerel et les Curie partagent le prix Nobel de physique en 1903. Marie Curie obtiendra en 1911 un second Nobel, de chimie cette fois, pour la mise au point des méthodes de la radiochimie.

Une première indication sur la nature de la radioactivité est obtenue en 1898 par Ernest Rutherford (1871-1937), physicien d'origine néozélandaise et étudiant de J. J. Thomson au laboratoire Cavendish³². En contact étroit avec Becquerel et les Curie, Rutherford établit qu'il existe deux types de rayonnements émis par l'uranium, qu'il nomme *alpha* et *beta*, distincts par la façon dont ils sont absorbés par la matière. Un troisième type de rayonnement, nommé *gamma*, plus pénétrant, est découvert deux ans plus tard par le français Paul Villard. À Montréal où il poursuit ses investigations, Rutherford montre en 1904 que ces rayonnements ne sont pas déviés de la même façon par un champ magnétique, et élucide la nature du rayonnement *alpha* comme constitué de particules lourdes bientôt identifiées à de l'hélium ionisé.

Rutherford est ainsi amené à l'idée que les corps radioactifs se transmutent les uns dans les autres, idée dérangeante récusée par la physique classique car renvoyant à celle de transmutation des éléments chère aux alchimistes médiévaux. Des mesures de variation au cours du temps de la radioactivité d'éléments isolés, menées avec le chimiste Frederick Soddy (1877-1956), montrent que cette radioactivité décroît exponentiellement. Cette observation conduit Rutherford à l'idée qu'un atome radioactif possède une certaine *probabilité* de se désintégrer, par unité de temps, idée tout à fait révolutionnaire. Un sérieux obstacle à l'élaboration de cette loi statistique est alors l'absence de la notion d'isotope, conçue plus tard par Soddy.

³² Heilbron (2003).

Rutherford comprend incidemment que l'énergie libérée par la radioactivité affecte le bilan thermique de la Terre tel que l'avait établi William Thomson ; l'âge de notre planète s'en trouve considérablement augmenté et ainsi en meilleur accord avec les estimations des géologues.

1.2.4. Contributions des physiciens français

Comment les physiciens français ont-ils participé au mouvement des découvertes du XIX^e siècle ? Ils ont, dans les premières décennies du siècle, brillamment contribué à la mathématisation des lois physiques, auxquelles se trouvent désormais attachés leurs noms – Laplace, Poisson, Cauchy, Fresnel, Ampère, Fourier. Mais une nette inflexion se dessine au milieu du siècle : les physiciens français tendent à se désintéresser des investigations théoriques et accordent la primauté plutôt à l'expérimentation³³. L'électricité et le magnétisme se prêtent particulièrement bien à cette évolution par la variété et la richesse de leurs manifestations. Les savants y consacrent désormais une large part de leurs travaux – sans abandonner l'optique jusque-là leur domaine de prédilection. La hiérarchie des sciences théorisée par Auguste Comte, qui place les mathématiques à leur sommet, n'est pas pour autant remise en cause et contribue plutôt à renforcer un partage des tâches entre expérimentateurs et théoriciens. Aux premiers d'établir les « faits », à l'écart de douteuses « spéculations » théoriques, aux seconds d'ordonner ces faits dans une architecture d'ensemble. Cette attitude positiviste est bien perceptible par exemple chez Hippolyte Fizeau, qui écrit, à propos des travaux d'Edmond Becquerel :

C'est donc après la physique expérimentale et en s'appuyant sur elle que la physique mathématique doit venir à son tour appliquer les principes généraux de la mécanique et les ressources de l'analyse pour développer les conséquences des phénomènes observés, mais sans jamais perdre de vue la réalité des choses, sous peine de s'égarer dans de stériles spéculations³⁴.

³³ Shinn (1979) ; Blondel (1998) ; Darrigol (2000, § 9.2) ; Atten (2006).

³⁴ H. Fizeau, cité par Blondel (1994, p. 176).

L'expérience bien faite, dont Victor Regnault (1810-1878) au Collège de France se fait le champion, est aussi la prédilection de la Société française de physique (SFP) – créée en 1873 –, comme en témoigne l'importance que cette société accorde à la diffusion des nouvelles techniques et appareils de mesure, en particulier lors de ses expositions annuelles³⁵.

Cette inclination pour l'expérimentation se trouve confortée et renforcée par l'existence d'un remarquable artisanat de fabricants d'instruments scientifiques de précision. Ceux-ci, tels Antoine Breguet ou Eugène Ducretet, souvent autodidactes mais de plus en plus fréquemment diplômés de l'université ou d'écoles d'ingénieur, déposent des brevets, exportent leurs inventions et publient leurs travaux dans les revues académiques³⁶. Les savants contribuent ainsi aux avancées de la technique électrique, tels Antoine et Edmond Becquerel (père et fils) pour la galvanoplastie, Léon Foucault pour l'éclairage, Édouard Branly pour la télégraphie sans fil, ou le physiologiste Arsène d'Arsonval pour les microphones. Dans le même esprit, Jules Jamin (1818-1886), haute figure de la Sorbonne dans les années 1860 et 1870 et secrétaire perpétuel de l'Académie des sciences, engage résolument son laboratoire dans l'électricité industrielle – il invente les aimants feuilletés, conseille la société d'éclairage Jablochkoff, puis crée sa propre société afin d'exploiter un brevet. Dans un domaine différent mais toujours dans le même esprit, Gabriel Lippmann – successeur de Jamin à la Sorbonne – met au point la photographie en couleurs, qui lui vaut le prix Nobel en 1908. Les physiciens contribuent ainsi au dynamisme de petits ateliers de production d'appareils, sans pour autant s'impliquer dans la création d'entreprises dont la dimension commerciale et gestionnaire n'entre pas dans leur culture³⁷. C'est donc plutôt en Angleterre et en Allemagne que naissent de grandes entreprises, ainsi que le déplore, dès 1881, Théodose du Moncel dans l'article cité plus haut.

Les physiciens expérimentateurs français de la seconde moitié du XIX^e siècle participent donc peu aux élaborations théoriques, mais manifestent un intérêt marqué

³⁵ Darrigol (2023).

³⁶ Blondel (1998).

³⁷ Atten (2006).

pour les applications industrielles de l'électricité, dans le contexte général d'une forte adhésion collective à l'idée de « Progrès ». Les investigations théoriques connaissent un regain d'intérêt au tournant du xx^e siècle, en liaison avec la nouvelle physique en gestation, notamment avec Henri Poincaré, Marcel Brillouin, Pierre Curie et Paul Langevin.

1.3. L'électrification de la France et l'hydroélectricité

Une condition du développement industriel de l'électricité est, outre la capacité de la produire, la possibilité de la transporter et de la distribuer aisément et dans de bonnes conditions de sécurité. Ces enjeux sont portés dès les années 1880 au centre de débats scientifiques, techniques et politiques³⁸.

1.3.1. Électrification du pays

Courant continu ou courant alternatif ? L'ingénieur Marcel Deprez, promoteur zélé du transport de l'électricité, relie en 1883 les villes de Vizille et Grenoble, distantes de quatorze kilomètres, par une ligne à courant continu. Le succès de la démonstration est toutefois mitigé, d'autres démonstrations s'avèrent même des échecs cuisants. Une controverse oppose alors Deprez à un autre inventeur, Lucien Gaulard, qui promeut de son côté – et brevète – le transport par courant alternatif. Le système de Gaulard et de son associé anglais John Gibbs éclaire en 1882 le métropolitain de Londres et démontre sa nette supériorité lors de l'Exposition de Turin en 1884. Deux ans plus tard, Gaulard éclaire la ville de Tours. Mais son adversaire Deprez bénéficie du soutien des éditeurs de la revue *La Lumière électrique* et de l'appui de Joseph Bertrand, secrétaire perpétuel de l'Académie des sciences. Ce parti pris d'institutions puissantes en faveur du courant continu est loin de faire l'unanimité parmi les électriciens, mais il oriente nettement les débuts de l'électrification du pays.

³⁸ Ramunni (1991a) ; Ramunni (1994) ; Hunt (2010, chap. 6).

La supériorité de l'alternatif réside dans la facilité avec laquelle la tension peut être élevée ou abaissée par un transformateur, condition nécessaire au transport de l'énergie sur de grandes distances. Élever la tension permet en effet de diminuer l'intensité du courant et donc de limiter l'échauffement des lignes et les pertes thermiques par effet Joule. Mais, argumentent ses détracteurs, la plupart des applications requièrent du courant continu, et notamment les moteurs. L'invention du moteur à courant alternatif, à la fin des années 1880, abolit l'argument. Facile à produire à partir d'un alternateur, le courant alternatif peut désormais être utilisé directement par des moteurs sans qu'il soit besoin de le « redresser » au préalable. Le transport de l'électricité par du courant alternatif va dès lors s'imposer. C'est ainsi qu'aux États-Unis, l'industriel George Westinghouse, associé à Tesla, prend l'avantage sur Edison resté attaché au courant continu. En France, les détracteurs du courant alternatif, emmenés par Deprez et appuyés sur l'autorité d'Edison, finiront également par céder.

Le déploiement du courant alternatif engendre une forte croissance de la production d'électricité, multipliée par quinze entre 1890 à 1918. Un tiers environ de cette puissance provient de machines à vapeur et deux tiers de chutes hydrauliques aménagées (Tableau 1.1). Quillan et Alet, dans le département de l'Aude, sont électrifiées en 1888 par Joachim Estrade (cf. section suivante). En 1901, celui-ci alimente Carcassonne et Narbonne depuis sa centrale de Saint-Georges sur l'Aude, par une ligne de plus de cent kilomètres à 20 000 volts alternatifs. Toulouse est électrifiée en 1889 à partir d'une génératrice installée sur la chaussée du Bazacle barrant la Garonne. En 1918, 4 000 communes françaises sont électrifiées.

Tableau 1.1 – Puissance installée (MW) des moteurs thermiques (à vapeur) et des chutes hydrauliques aménagées, destinées à la production d'électricité (d'après Morsel (1991a, p. 507)).

	1890	1900	1910	1913	1918
Sources thermiques	16	100	290	540	500
Sources hydrauliques	88	150	440	550	880

Dans l'entre-deux-guerres, la production française d'électricité poursuit sa forte croissance, quintuplant entre 1919 et 1939, de quatre à vingt-deux milliards de kilowatts-heures³⁹. Dans la même période, le nombre de communes électrifiées passe de 4 000 à 34 000 – sur un total de 38 000 communes. Les usages de l'électricité se diversifient considérablement, tant dans l'industrie que dans la vie domestique.

1.3.2. Essor de l'hydroélectricité

Comme mentionné ci-dessus, la croissance de la production électrique dans la première moitié du xx^e siècle est, dans une large mesure, rendue possible par l'essor de l'hydroélectricité, essor dont on présente ici un bref panorama.

L'énergie hydraulique. L'utilisation de l'énergie des cours d'eau pour actionner moulins, soufflets de forge et machines diverses, s'appuie depuis l'Antiquité sur deux techniques de moteurs hydrauliques, à roue verticale ou à roue horizontale⁴⁰. Ces roues connaissent des perfectionnements importants au xix^e siècle. Le mathématicien français Jean-Victor Poncelet (1788-1867) introduit ainsi, sur les roues verticales, un déflecteur qui permet à l'eau d'attaquer tangentiellement des aubes courbes (prix Montyon de l'Académie des sciences en 1825). Des roues d'une dizaine de mètres de diamètre, sur des chutes de deux ou trois mètres de hauteur, délivrent ainsi une puissance de quelques dizaines de kilowatts. L'autre technique, celle des roues horizontales (à axe vertical), est mise en œuvre notamment au moulin du Bazacle, sur la Garonne à Toulouse, dès la fin du xii^e siècle⁴¹. La première réalisation industrielle est due à Benoît Fourneyron (1802-1867), qui, en 1827, anime ainsi un soufflet de forge avec une puissance de 37 kilowatts. La turbine de Fourneyron améliore une invention de Claude Burdin,

³⁹ Lévy-Leboyer (1995, p. 13).

⁴⁰ Viollet (2005, chap. 1) ; Viollet (2017) ; M. Chalons, L'évolution des turbines, *in* (Actes du 3^e Congrès de la Houille Blanche, 1925, p. 729-761, <https://www.persee.fr/collection/jhydr>).

⁴¹ Viollet (2005, p. 61-62) ; le rendement de l'installation était, en 1821, de 35 % (p. 144 et 163).

professeur à l'École des mines de Saint-Étienne à qui l'on doit le mot de « turbine », où la roue est alimentée par un distributeur à ailettes disposé à l'intérieur de la roue (Figure 1.7)⁴². La turbine de Fourneyron, brevetée, équipe plus d'une centaine d'installations en Europe et aux États-Unis. Plusieurs variantes apparaissent dans les années 1840, dont celle de l'ingénieur américain James B. Francis, où la roue est alimentée par l'extérieur⁴³. La turbine Francis s'imposera pour les chutes moyennes (de 10 à 100 mètres) et les débits importants.

Un autre type de turbine est mis au point en 1880 par l'ingénieur Lester A. Pelton, en Californie, en relation avec la question du lavage du minerai aurifère. Cette turbine, dont la roue est constituée d'augets en forme de double cuillère frappés par des jets issus de buses, équipera la plupart des installations de haute chute (de hauteur supérieure à 100 mètres) à débit faible. Une autre innovation importante, développée entre 1910 et 1924, est la turbine de Viktor Kaplan, ingénieur autrichien et professeur à l'université de Brno⁴⁴. Il s'agit d'une turbine axiale, à aubes à angle variable. Bien adaptée aux basses chutes, elle équipe notamment, dans les années 1930, les usines au fil de l'eau sur le Rhin (30 000 kilowatts par turbine). Parmi les hydrauliciens français se détache le savant et ingénieur Auguste Rateau, auteur d'une théorie générale des turbomachines, fondateur d'une entreprise industrielle réputée et élu en 1918 à l'Académie des sciences⁴⁵.

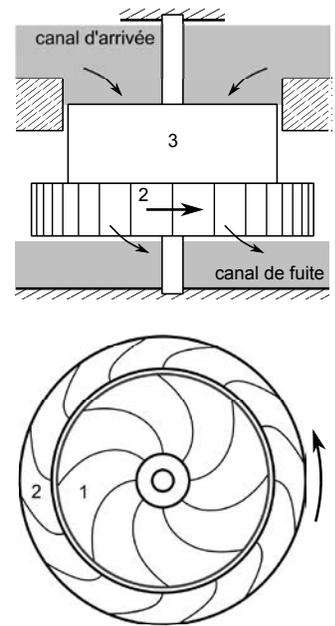


Figure 1.7 Turbine Fourneyron (1827) : l'eau entre par le haut dans les aubes fixes 1 qui dévient l'écoulement vers l'extérieur et vers l'avant ; cet écoulement entraîne en rotation les aubes mobiles 2 puis s'échappe dans le canal de fuite. Le cylindre 3 interposé entre les aubes fixes et mobiles permet, par son déplacement vertical, de contrôler le débit.

⁴² Rouse & Ince (1957, p. 106-107, 146-148) ; Hager (2009, p. 914). La puissance mécanique délivrée (pour une utilisation directement mécanique ou pour sa conversion en électricité) est $P = \eta \rho g H Q_v$, où $\rho = 1000 \text{ kg m}^{-3}$ est la masse volumique de l'eau, $g = 9,81 \text{ m s}^{-2}$ l'accélération de la gravité, H la hauteur de la chute, Q_v le débit-volume d'eau, et η un coefficient de rendement voisin de 0,8 pour une bonne installation.

⁴³ Hager (2009, p. 1586).

⁴⁴ Rouse & Ince (1957, p. 223).

⁴⁵ Auguste Rateau (1863-1930), ancien élève de l'École polytechnique et de l'École des mines de Paris, est professeur aux Mines de Saint-Étienne (1888-1897) puis aux Mines de Paris (1902-1910) où il crée le laboratoire d'électricité. Il fonde en 1897 un bureau d'études puis une société de construction de ventilateurs et de turbomachines (pompes centrifuges, turbines à vapeur, etc.) plus tard absorbée par Alsthom. Brillant professeur et ingénieur de renommée internationale, auteur de nombreux brevets, il invente notamment le turbocompresseur pour

Les progrès des turbines dans la deuxième moitié du XIX^e siècle sont tels qu'ils ramènent vers l'hydraulique des industries qui s'étaient converties à la machine à vapeur. Ainsi la puissance hydraulique installée en 1890 dans les six départements pyrénéens est voisine de 70 000 kilowatts (cinq fois supérieure à celle des machines à vapeur) répartie sur plus de 5000 usines⁴⁶. L'énergie hydraulique est en général utilisée sur place mais elle peut aussi être transportée sur de courtes distances par de l'air ou de l'eau sous pression, par exemple pour des travaux souterrains dans les mines, pour le percement des tunnels sous les Alpes, ou, en Suisse, pour l'industrie horlogère. Dans les années 1850-1880, cette énergie est aussi transportée par des « câbles téléodynamiques » entre une poulie montée sur l'arbre de la turbine et la roue de la machine à entraîner. Les puissances ainsi transmises, sur des distances de l'ordre du kilomètre, atteignent quelques centaines de kilowatts⁴⁷.

Premières réalisations hydroélectriques. À l'utilisation directe de l'énergie hydraulique, se substitue à partir des années 1870 sa conversion préalable en électricité par une dynamo ou un alternateur⁴⁸. Parmi les nouvelles utilisations figure l'éclairage domestique – la ville réputée la première à en bénéficier, en 1878, est Cragside dans le Northumberland (Angleterre)⁴⁹. Les grands aménagements hydrauliques, dont la Figure 1.8 montre le schéma général, sont désormais destinés à la production d'électricité plutôt qu'à la production directe d'énergie mécanique.

les moteurs à combustion interne. Honoré par plusieurs universités étrangères, président ou membre de nombreuses sociétés savantes ou techniques, il est élu à l'Académie des sciences en 1918. Il participe en 1928 à la création de l'Association française de normalisation, qu'il préside (É. Jouguet, Auguste Rateau, *Annales des Mines*, 13^e série, t. 2, 1932).

⁴⁶ Crausse (2008, p. 36).

⁴⁷ Viollet (2005, p. 160-161).

⁴⁸ Morsel (1991b).

⁴⁹ Une turbine Thomson entraîne un générateur d'électricité produisant sept kilowatts sous 90 volts (Viollet, 2005, p. 161). L'inventeur de cette turbine est James Thomson (1822-1892), physicien et ingénieur britannique, frère aîné de William Thomson (Lord Kelvin).

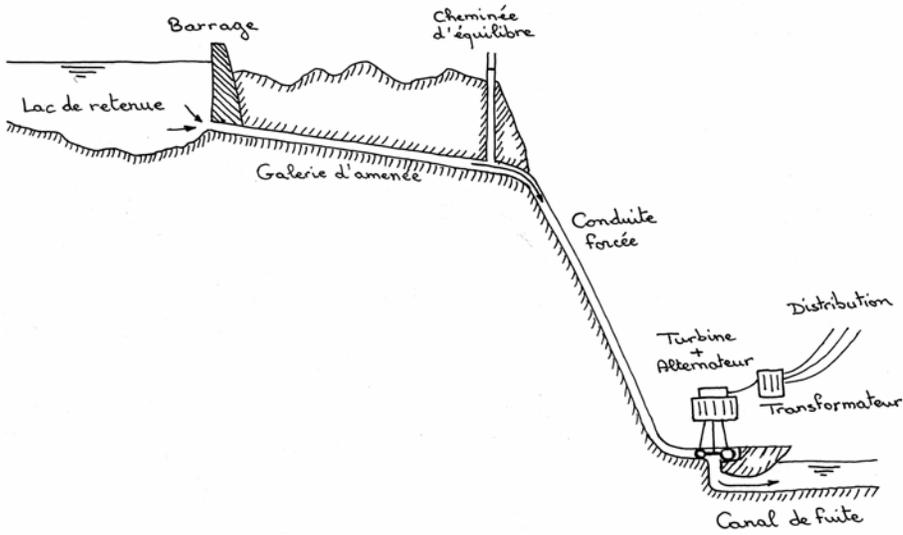


Figure 1.8 Schéma d'une usine hydroélectrique de haute chute.

Un pionnier français de l'industrie hydraulique puis hydroélectrique est l'entrepreneur d'origine ariégeoise Aristide Bergès (1833-1904). En 1869, il rachète un ancien moulin à Lancey, dans la vallée de l'Isère, et ouvre une fabrique de pâte à bois⁵⁰. Ses deux machines à défibrer le bois, hydrauliques, sont alimentées par une conduite forcée métallique sur 150 puis 200 mètres de dénivelé. Quelques années plus tard, Bergès produit lui-même son papier à partir de la pâte. L'activité se développe notamment avec la captation de l'eau d'un lac voisin, rehaussé par un barrage, et par le détournement de plusieurs cours d'eau. En 1899, la puissance disponible à Lancey atteint 2200 kilowatts durant l'hiver et 3700 kilowatts l'été. Industriel médiatique et peu scrupuleux – il doit affronter de nombreux procès pour des détournements d'eau sans autorisation –, Bergès est le promoteur de l'expression « houille blanche » pour désigner l'énergie hydraulique – expression empruntée à Camillo Cavour, l'artisan de l'unité politique italienne (*il carbone bianco*).

⁵⁰ Viollet (2005, p. 152-154).

La première branche industrielle à bénéficier de l'hydroélectricité est l'électrochimie, qui se développe en particulier dans la région de Grenoble sous l'impulsion de consortiums d'industriels et de banquiers. L'hydroélectricité contribue plus généralement à l'électrification du pays, avec la création de sociétés de distribution qui étendent leur réseau toujours plus loin, vers la vallée du Rhône et la Méditerranée.

Dans les Pyrénées, l'hydroélectricité se développe dès la fin du XIX^e siècle avec des précurseurs tel Joachim Estrade – qui éclaire en 1888 les communes de Quillan et Alet-les-bains, dans l'Aude –, puis avec la Compagnie des chemins de fer du Midi (cf. chap. 5). À Toulouse, le barrage du Bazacle sur la Garonne produit 150 kilowatts dès 1889, à partir d'une chute de 4,4 mètres de hauteur.

Aux États-Unis, la première grande centrale est mise en service en 1895 sur les chutes du Niagara⁵¹. Le choix du courant alternatif triphasé, à 25 hertz sous 11 000 volts, consacre la victoire de Westinghouse et Tesla sur leur concurrent Edison, promoteur du courant continu⁵². Au seuil du XX^e siècle, des usines de puissance comparable alimentent Genève, Lausanne, Milan et Lyon. Pour ces usines construites sur des barrages au fil de l'eau, ou au pied de chutes d'une dizaine de mètres de hauteur, l'emploi de la turbine Francis se généralise.

Pour optimiser la production et faire face à l'intermittence de la consommation (plus élevée le jour que la nuit), apparaît l'idée d'utiliser les heures creuses pour remonter l'eau vers des réservoirs. Par ailleurs, l'irrégularité saisonnière des torrents pousse à l'aménagement des lacs d'altitude, au fond desquels sont percés des tunnels et galeries acheminant l'eau vers des conduites forcées. Des barrages viennent surélever la surface des lacs et augmenter leur capacité, comme le fait Bergès sur le lac Crozet.

⁵¹ Un puits creusé sur une dérivation de la Niagara River, en amont des chutes, amène l'eau à trois turbines Fourneyron de 3 700 kilowatts chacune, installées à 60 mètres de profondeur au fond du puits – les plus grosses encore jamais construites, mises au point à Genève par la société Piccard & Pictet. L'eau est restituée à la rivière en aval des chutes, au bout d'un tunnel de deux kilomètres. L'électricité est transportée sur 40 kilomètres à la ville de Buffalo, où elle alimente l'éclairage, des ateliers, des fonderies, et le tramway.

⁵² Hunt (2010, p. 135-136) ; Viollet (2005, p. 167).

Entre-deux-guerres. La production de « houille blanche », devenue un enjeu national, est règlementée à partir de 1919 par une loi importante établissant en particulier le régime des concessions hydrauliques. Selon ce régime – toujours en vigueur aujourd’hui –, toute exploitation hydraulique par une entreprise privée doit faire l’objet d’une concession par l’État, après déclaration d’utilité publique et pour une durée définie. La concession impose également certaines conditions d’utilisation, préservant notamment un débit minimal des cours d’eau. Cette loi met ainsi un terme aux spéculations sur les droits d’usage de l’eau, achetés aux communes puis revendus au prix fort. Ces questions sont désormais gérées par un service des « forces hydrauliques » du ministère des Travaux publics.

De 1923 à 1940, la part de l’hydraulique dans la production française d’électricité croît de 45 à 60 %, l’autre part revenant aux centrales thermiques au charbon⁵³. Après les Alpes et les Pyrénées, les régions du Rhin, des Vosges et du Massif central sont à leur tour aménagées, notamment pour l’alimentation en électricité de Paris et de sa région. C’est ainsi qu’est créé, dans les années 1930, le complexe hydroélectrique de la Truyère, affluent du Lot : plusieurs barrages et réservoirs alimentent, à travers un réseau de tunnels, l’usine de Brommat (1932, 175 mégawatts), tandis que plus à l’amont, un imposant barrage-poids de 105 mètres de hauteur alimente celle de Sarrans (1934, 102 MW). Plusieurs ouvrages sont également construits sur la Dordogne, à Marèges (1935, 140 MW), l’Aigle (1948, 200 MW), Chastang (1951, 230 MW) et Bort-les-Orgues (1952, 230 MW)⁵⁴. Ces ouvrages représentent des tours de force techniques. À Marèges, le barrage-voûte appuyé sur les flancs de la vallée, œuvre de l’ingénieur André Coyne, est le plus élevé d’Europe à sa mise en service. À Chastang, le diamètre des conduites forcées atteint la valeur impressionnante de 5,75 mètres⁵⁵.

⁵³ Lévy-Leboyer & Morsel (1995, p. 733).

⁵⁴ Viollet (2005, p. 186).

⁵⁵ Kerisel (2001) ; Chastang, *La Houille Blanche*, p. 424-434 (1953), <https://www.shf-lhb.org/fr/component/issues/>

1.3.3. Réseaux de distribution et interconnexions

Standardisation des hautes tensions et interconnexions.

L'électrification générale du pays fait apparaître la nécessité, dès la fin du XIX^e siècle, de mettre en réseau la production, au travers d'un maillage de lignes de transport à haute tension reliant notamment les centres urbains aux usines de production thermiques ou hydroélectriques. La question devient centrale dans l'entre-deux-guerres, où il s'agit moins, désormais, d'améliorer les appareils eux-mêmes (ampoules lumineuses, moteurs, génératrices, transformateurs...) que de normaliser la production, interconnecter les réseaux locaux de distribution et veiller à la sécurité⁵⁶. L'État y prend une part croissante, notamment dans l'architecture générale des réseaux et la définition des normes. Administrations et compagnies privées, dont les intérêts peuvent ne pas concorder, apprennent à travailler ensemble. À l'instigation de l'administration des Ponts et Chaussées, la tension des grandes lignes est ainsi progressivement standardisée et relevée : de 120 000 volts en 1919, elle est portée à 220 000 volts dans les années 1930.

L'électricité se stockant difficilement, la production doit pouvoir s'adapter rapidement à une demande fluctuante. L'interconnexion des réseaux de distribution doit répondre à cet enjeu, mais impose d'homogénéiser les caractéristiques du courant produit (fréquence et tension) et de répartir au mieux ce courant entre producteurs et consommateurs – c'est la question du « dispatching ». Il s'agit également de pouvoir réagir rapidement à de possibles incidents tels qu'une rupture de ligne.

Les producteurs, attachés à leur monopole dans le « secteur » sur lequel ils opèrent, et mal préparés aux problèmes techniques qui surgissent, opposent cependant des résistances à l'interconnexion. Contre ces producteurs, Georges Darrieus, ingénieur à la Compagnie électro-mécanique et membre de l'Académie des sciences, promeut l'idée que c'est l'architecture des réseaux, pensée par les pouvoirs publics, qui doit commander le choix des composants, et non l'inverse. Il écrit à ce propos, en 1923 :

Nous sommes ainsi amenés à considérer comme inéluctable l'évolution qui, grâce à l'unification de la

⁵⁶ Ramunni (1995b).

fréquence, groupe peu à peu des réseaux contigus en de vastes systèmes maillés dont l'envergure croissante embrassera dans un avenir plus ou moins proche des continents entiers. De ce point de vue d'ailleurs, il nous paraît douteux que la transmission par courant continu réussisse à l'emporter en rendement, en souplesse et en originalité d'adaptation, sur le mode actuel de distribution par réseaux bouclés à courant alternatif, à fréquence et à potentiel constants, qui possède dans le déphasage [...] une ressource propre et un précieux moyen de réglage ; tandis qu'en courant continu, la chute de tension, liée à la perte d'énergie, est inévitable⁵⁷.

Ces lignes montrent que le débat sur le courant continu ou alternatif n'est pas complètement clos, la traction ferroviaire, notamment, persistant à préférer le continu. La distribution par courant alternatif triphasé s'est cependant largement imposée, si bien que le retard de l'électrification française, par rapport à la Grande-Bretagne en particulier, est considéré comme comblé en 1932.

La question du déphasage. La citation de Darrieus ci-dessus évoque une autre question alors sujet d'âpres débats, celle du déphasage entre courant et tension. Tout composant électrique alimenté en alternatif introduit, en général, un déphasage entre le courant et la tension à ses bornes. Une ampoule d'éclairage, simple résistance, n'introduit aucun déphasage, mais un moteur, du fait de l'inductance des bobinages, ou un condensateur de stockage, peut introduire un déphasage important. Ce déphasage peut, d'une part, perturber le fonctionnement d'une installation voisine, et fausse, d'autre part, la détermination par les compteurs de l'énergie effectivement fournie par le producteur et mal utilisée par le consommateur⁵⁸.

⁵⁷ G. Darrieus, Quelques problèmes relatifs à l'interconnexion de réseaux bouclés d'extension indéfinie, *in* (Comptes rendus de la troisième conférence des Grands Réseaux, éd. J. Tribot-Laspière, Union des syndicats de l'électricité, Paris, 1925, p. 910, cité par Ramunni (1995b, p. 578-579)).

⁵⁸ Rocard (1951, p. 233-236). Dans un composant parcouru par un courant sinusoïdal, la puissance dissipée moyenne est $UI \cos \phi$ où U est la tension efficace à ses bornes, I le courant efficace qui le traverse, et $\cos \phi$ est le « facteur de puissance », cosinus du déphasage ϕ entre courant et tension. C'est cette puissance « wattée » que mesurent les wattmètres ou les compteurs à induction et qui est facturée à l'utilisateur.

Dans l'entre-deux-guerres, cette question agite beaucoup le milieu des électriciens, tant du côté académique que du côté industriel⁵⁹. Diverses solutions sont discutées pour réduire le déphasage introduit en particulier par les moteurs, par l'interposition de condensateurs ou autres appareils compensateurs de phase, ou par le recours à des alternateurs à forte impédance. On envisage aussi de facturer, en plus de l'énergie « wattée » que mesurent les watt-mètres usuels, l'énergie dite « réactive » ou « déwattée », à l'aide de watt-mètres spéciaux. Darrieus et Langevin promeuvent l'interconnexion des réseaux, qui doit, par un effet d'homogénéisation, atténuer les déphasages introduits par les divers composants. Ils préconisent également, contre l'empirisme des ingénieurs, des méthodes de calcul fondées sur la théorie de l'électromagnétisme, tant pour la conception des réseaux que pour celle des nouveaux composants de régulation et protection qui apparaissent (fréquencemètres, ampèremètres intégrateurs, compteurs à induction, interrupteurs, relais, disjoncteurs, isolateurs, etc.).

1.4. De l'électron à l'électronique

Nous terminons ce chapitre par un bref aperçu sur la révolution que connaît la physique au début du xx^e siècle, sur sa réception en France, et sur l'émergence d'une nouvelle branche de l'électricité, l'électronique.

1.4.1. Une nouvelle physique

L'unification par Maxwell des lois de l'électricité et du magnétisme, dans les années 1870, puis les découvertes de la fin du siècle – électron, rayons X, radioactivité – laissent en suspens d'importantes questions relatives à la structure des atomes et du rayonnement (lumière, chaleur, ondes de Hertz). Ces questions se dénouent dans les premières années du xx^e siècle, inaugurant une nouvelle physique fondée sur une description corpusculaire du monde physique et renonçant au cadre général newtonien d'un espace et d'un temps absolus.

⁵⁹ Ramunni (1995*b*, p. 516-533).

Le monde physique est quantique. Le pas inaugural est réalisé par le physicien allemand Max Planck (1858-1947) qui, en 1900, parvient à résoudre un problème ancien mais coriace, celui de la distribution des fréquences – le spectre – du rayonnement thermique émis par un « corps noir » (corps absorbant tout le rayonnement qui lui parvient). Pour le résoudre, Planck est amené à considérer qu'à l'échelle atomique, l'énergie n'est pas distribuée de façon continue mais varie par sauts discrets, le *quantum* élémentaire d'énergie s'écrivant $h\nu$ où h est une constante universelle et ν la fréquence de vibration des résonateurs modélisant les atomes. Reprenant le problème cinq ans plus tard, Albert Einstein (1879-1955) montre que l'énergie du rayonnement doit aussi être quantifiée, le quantum d'énergie de Planck étant transporté par des corpuscules baptisés photons. La lumière, et plus généralement tout champ électromagnétique, possède ainsi une double nature, ondulatoire comme l'a établi Augustin Fresnel (1788-1827) au siècle précédent, et corpusculaire. L'effet photo-électrique observé par Hertz s'en trouve au passage expliqué. Cette quantification de l'énergie, idée révolutionnaire que Planck lui-même n'admet qu'avec réticence – il la considèrera longtemps comme un simple artifice de calcul –, s'avèrera bien correspondre à une réalité profonde du monde physique.

Espace et temps sont relatifs. L'électromagnétisme de Maxwell, revu par Lorentz qui y introduit une structure moléculaire de la matière, permet d'interpréter la quasi-totalité des phénomènes optiques et électromagnétiques connus à la fin du siècle, mais laisse encore apparaître des difficultés. En particulier, il ne rend pas compte de l'absence d'effet du mouvement de la Terre sur la propagation de la lumière émise par une source terrestre – absence révélée par les expériences de Michelson-Morley en 1887. Ces difficultés et le maintien du postulat d'une invariance des phénomènes électrodynamiques lors d'un changement de référentiel inertiel – invariance respectée par les équations de Maxwell-Lorentz –, entraînent Henri Poincaré puis Einstein à remettre en question le caractère absolu de l'espace et du temps. Cette remise en question aboutit en 1905 à la théorie de la relativité restreinte d'Einstein.

Poursuivant ses réflexions sur la nature de la gravitation et inspiré par les travaux d'Hermann Minkowsky (1864-1909) sur les géométries non euclidiennes, Einstein

parvient quinze ans plus tard à la théorie de la relativité générale. La matière y est associée à une courbure de l'espace-temps et le mouvement gravitationnel y correspond à une géodésique de cet espace-temps (ligne de plus court chemin). La théorie est rapidement confirmée par plusieurs observations : avance relativiste du périhélie de Mercure, déviation gravitationnelle des rayons lumineux et décalage vers le rouge de ces rayons.

Modèles d'atomes. Dans une autre direction, se pose la question de l'organisation de la matière à l'échelle atomique, et de la place de l'électron dans cette organisation. Les expériences que mène Rutherford à Manchester, sur la diffusion de particules *alpha* traversant une mince feuille d'or, le mettent sur la piste de son fameux modèle d'atome : un noyau lourd extrêmement petit et chargé positivement, autour duquel tournent les électrons comme des planètes autour de leur étoile (1911).

Le modèle de Rutherford, qui a l'inconvénient de ne pas être stable, est repris par le physicien danois Niels Bohr (1885-1962), qui y introduit une quantification des orbites des électrons (1913), puis par l'Allemand Arnold Sommerfeld (1868-1951). Cette quantification permet notamment d'interpréter la distribution spectrale des raies d'émission de l'hydrogène : l'émission d'un photon d'énergie $h\nu$ correspond au changement d'orbite d'un électron.

De la reconnaissance d'éléments chimiquement identiques mais de radioactivités différentes, émerge le concept d'isotopes (Frederick Soddy, 1913) – noyaux de même charge mais de masses différentes –, concept bientôt étendu aux éléments non radioactifs. La particule électriquement neutre qui différencie les isotopes d'un même élément, le neutron, est identifiée expérimentalement en 1932 par James Chadwick.

Vers une véritable mécanique quantique. Les *quanta* introduits entre 1900 et 1920 par Planck, Einstein, Bohr et Sommerfeld, rompent avec l'idée de continuité du monde physique mais restent décrits dans le cadre de la mécanique et de l'électromagnétisme classiques. Des incohérences en résultent, aggravées par la difficulté d'interprétation de nouvelles observations expérimentales. Une refonte d'ensemble des premières théories aboutit au milieu des années 1920 à une « deuxième mécanique

quantique » fondée sur des idées radicalement nouvelles. Ses artisans majeurs, Werner Heisenberg (1901-1976), Wolfgang Pauli (1900-1958), Paul Dirac (1902-1984), Louis de Broglie (1892-1987) et Erwin Schrödinger (1887-1961), en proposent des formulations différentes mais pour l'essentiel équivalentes, dont le point commun est de renoncer, pour la description d'objets à l'échelle atomique, aux notions classiques d'onde et de particule localisée, et de s'appuyer de façon fondamentale sur la notion de probabilité d'une observation.

1.4.2. Diffusion des nouvelles idées

La réalité des atomes, qui ne fait aucun doute pour des savants tels que James Joule (1818-1889), Maxwell ou Ludwig Boltzmann (1844-1906), est cependant fortement contestée jusqu'à la fin du XIX^e siècle par les « énergétistes » qui, emmenés par Ernst Mach (1838-1919) et Wilhelm Ostwald (1853-1932), persistent à vouloir fonder la physique sur des lois phénoménologiques macroscopiques et notamment sur la conservation de l'énergie⁶⁰. En France, les résistances sont enracinées dans la vénération portée à l'expérience de laboratoire, aveugle aux dimensions atomiques, et dans la suspicion qui entoure les « spéculations » théoriques. Ainsi, l'atome est-il vigoureusement combattu jusqu'au tournant du XX^e siècle par le chimiste Marcelin Berthelot (1927-1907), influent professeur au Collège de France et ministre de l'Instruction publique, pontife du scientisme conquérant. La physique atomique ne s'introduit ainsi que très tardivement dans l'enseignement français, notamment sous l'influence du livre *Les Atomes* de Jean Perrin, publié en 1913⁶¹.

La physique quantique et relativiste se trouve de même entravée, dans les premières années du XX^e siècle, par les habitudes de pensée, conservatismes et nationalismes. Einstein n'est ainsi reçu en France qu'en 1913,

⁶⁰ Hunt (2010, chap. 3).

⁶¹ Le livre de Perrin (1913) décrit treize expériences de natures variées permettant chacune de déterminer, de façon indépendante, une valeur du nombre d'Avogadro. La convergence de ces déterminations vers une même valeur, proche de 6×10^{23} est présentée par Perrin comme un argument très fort en faveur de « l'hypothèse atomique ».

pour la première fois, soit huit ans après la publication de ses fameux travaux sur les quanta de lumière, le mouvement brownien et la relativité restreinte. Il y revient en 1922, invité au Collège de France par Langevin, mais l'ostracisme dont les savants allemands sont alors l'objet lui ferme les portes de l'Académie des sciences et de la Société française de physique⁶². Les débats autour de la « physique d'avant-garde » restent ainsi largement confinés, jusqu'aux années 1920, dans le petit cercle des savants parisiens participant aux congrès Solvay où se rencontrent régulièrement ses principaux acteurs⁶³.

Cette physique et les concepts qu'elle introduit engendrent de vigoureux débats scientifiques et philosophiques. Celui qui oppose Einstein à son ami Bohr à propos de la « réalité » du monde physique, à partir de 1927, marque durablement les esprits⁶⁴. Selon Bohr, la seule façon d'échapper aux contradictions et paradoxes insolubles que fait surgir la mécanique quantique, est de définir la réalité comme ce qui peut être observé expérimentalement. Ce point de vue positiviste a pour corollaire que la physique doit renoncer à vouloir se prononcer sur l'existence d'une réalité objective, et doit se satisfaire de prédictions de type probabiliste sur des phénomènes observables. Einstein ne partage pas ce point de vue et défend plutôt une conception réaliste selon laquelle il existe bien une réalité indépendante de son observation, que les physiciens doivent s'attacher à découvrir. Les répercussions de ce débat sur la vie intellectuelle, au-delà de la physique, sont considérables, renouvelant notamment les questionnements philosophiques – déterminisme, hasard, continuité, réalité, être, temps...

Ces débats pénètrent cependant peu dans les facultés françaises et les instituts électrotechniques créés au début du siècle. La formation des ingénieurs fait en effet une

⁶² Darrigol (2023).

⁶³ Pestre (1992). Le premier des congrès Solvay – du nom de leur mécène Ernest Solvay –, en 1911, est consacré à la théorie du rayonnement et des quanta. Il rassemble une trentaine de participants invités dont six Français : Marcel Brillouin, Maurice de Broglie, Marie Curie, Paul Langevin, Jean Perrin et Henri Poincaré. Six autres congrès Solvay se tiendront avant la Seconde Guerre mondiale.

⁶⁴ d'Espagnat (1980, chap. 7).

large place aux applications, encore toutes fondées sur la physique classique. La nouvelle physique s'introduit tout de même, par le biais de conférences, dans les enseignements d'électronique, nouvelle branche de l'électricité à laquelle les instituts font une place grandissante dans l'entre-deux-guerres.

1.4.3. Avènement de l'électronique

La puissance de l'électricité sur l'imaginaire collectif, qui s'est exprimée de façon spectaculaire lors de l'Exposition de 1881, demeure forte dans l'entre-deux-guerres comme en témoigne *La fée Électricité*, immense fresque historique de six cents mètres carrés réalisée par Raoul Dufy pour l'Exposition universelle de 1937 (Figure 1.9).



Figure 1.9 *La fée Électricité* (détail), fresque de six cents mètres carrés réalisée par Raoul Dufy pour l'Exposition universelle de Paris de 1937 ; on y lit les noms des principaux savants ayant contribué au développement de l'électricité. © Adagp Paris [2024].

De nouvelles applications liées au développement de l'électronique – radiophonie, télévision, radar, optique électronique, photoélectricité... –, dont un bref aperçu est donné ci-dessous, sont alors en passe de bouleverser les modes de vie⁶⁵.

Diodes et triodes, premiers composants électroniques.

La lampe diode, inventée en 1904 par l'ingénieur et physicien anglais John A. Fleming, est le premier « composant électronique ». Elle a la propriété de ne laisser passer le courant que dans un seul sens, permettant ainsi de « redresser » un courant alternatif. La lampe triode, inventée trois ans plus tard par l'américain Lee de Forest, inaugure une véritable révolution. Sa troisième électrode, une « grille » interposée entre cathode et anode, rend possible l'amplification de signaux faibles. Insérée dans un circuit oscillant (association d'une bobine et d'un condensateur), la triode permet également d'obtenir des oscillations entretenues. Les tubes électroniques et leurs évolutions (pentodes, octodes, etc.) ouvrent à l'électronique d'immenses perspectives.

Radioélectricité, radiophonie. Dans le domaine de la radioélectricité, le montage « hétérodyne » de triodes permet, à partir du signal à basse fréquence issu d'un microphone, de moduler l'amplitude d'une onde à haute fréquence. Ainsi prend naissance la radiotéléphonie. Les premiers essais de radiodiffusion, à la fin de l'année 1921, sont ceux du poste militaire de la tour Eiffel. Dans la région toulousaine, Radio-Toulouse, station privée, est mise en service le 1^{er} avril 1922, bientôt suivie par Toulouse-Pyrénées, station publique relevant du ministère des Postes, Télégraphes et Téléphones.

L'idée que les ondes radioélectriques, lors de leur propagation dans l'atmosphère, suivent la rotondité de la Terre, conduit à la mise en œuvre d'ondes de plus en plus longues (kilométriques) créées par des antennes de plus en plus grandes, antennes elles-mêmes excitées par des oscillateurs de plus en plus puissants – plusieurs centaines de kilowatts. Mais les

⁶⁵ Rocard (1951, partie VII) ; Aitken (1985) ; Lelong (2005) ; Anduaga (2016).

radioamateurs, auxquels les militaires ont délaissé les ondes courtes, découvrent que celles-ci peuvent aussi se propager très loin avec des puissances d'émission bien plus faibles. Le mystère est levé lorsqu'on comprend que cette propagation est rendue possible par des réflexions successives entre la haute atmosphère, constituée de gaz ionisés (l'ionosphère), et la surface de la Terre elle-même assez conductrice. Ainsi apparaissent les « petites ondes » puis les « ondes courtes » (trente à cent mètres) des récepteurs radio.

Le radar. Les ondes radioélectriques ont la propriété de rayonner dans toutes les directions à partir de l'antenne émettrice. Cette propriété est un avantage pour la diffusion radiophonique mais devient un inconvénient pour la transmission d'informations confidentielles, militaires par exemple. Par analogie avec la propagation de la lumière, dont les faisceaux peuvent être dirigés par des miroirs, on réalise qu'un faisceau d'ondes radioélectriques peut de même être dirigé, pourvu que la longueur d'onde soit petite devant la dimension – métrique – des miroirs. Ces idées amènent à la conception dans les années 1930 d'émetteurs d'ondes décimétriques et centimétriques, mettant en jeu de nouvelles lampes électroniques : les magnétrons et les klystrons. La localisation d'obstacles ou de cibles hors du domaine visible devient possible, engendrant la mise au point de la radiogoniométrie et du radar. Les ondes de Hertz étaient déjà de telles ondes, décimétriques, mais il s'agissait alors d'ondes amorties et de très faible puissance. Le premier système d'atterrissage sans visibilité pour les avions apparaît ainsi en 1939.

L'optique électronique. L'optique électronique, qui manipule les faisceaux d'électrons comme des faisceaux lumineux, apparaît à la fin des années 1920. Le microscope électronique à lentilles magnétiques en est une réalisation remarquable : il permet de former des images de petits objets avec une résolution bien supérieure à celle qu'autorise la lumière visible. Breveté en 1931, sa première réalisation commerciale, par Siemens, date de 1938. Gaston Dupouy, professeur de physique à la faculté des sciences de Toulouse, met au point le premier microscope électronique français, qui entre en service après la guerre.

Diversification des fonctions de l'électronique. Dans les années 1930, l'électronique s'émancipe de la radioélectricité avec l'apparition de nouvelles fonctions, telles que la mesure de températures, la mesure du temps par des horloges, la détection et la mesure de lumière par des cellules photoélectriques, le comptage automatique ou la commande de machines. Les composants se miniaturisent. L'oscillographe à rayons cathodiques (oscilloscope), qui permet de visualiser des signaux à variation rapide, connaît un grand succès. Prolongement de l'oscillographe cathodique, la télévision fait son apparition dans les mêmes années. La première émission publique de télévision française est réalisée en avril 1935 à partir du ministère des Postes, Télégraphes et Téléphones (PTT).

Chapitre 2

Enseignement supérieur et recherche

J'ai déjeuné ce matin chez N***, ancien ministre de l'Instruction publique et des Beaux-Arts, dont la maison est fréquentée par une foule brillante de peintres, de sculpteurs, de littérateurs, de savants, d'hommes politiques et d'hommes du monde. Je m'y rencontrai avec [des personnes] fort diverses d'esprit et de mœurs, se ressemblant toutes par cet air apaisé que donne l'habitude de la célébrité. Ils étaient au régime pour la plupart, et des bouteilles d'eaux minérales couvraient la table. Chacun avoua quelque misère de l'estomac, du foie ou des reins. [...] On attaqua tous les sujets, théâtre, littérature, politique, art, affaires, scandales, nouvelles du jour, mais de biais et légèrement. Ces hommes avaient pris avec l'âge des façons assez douces. Le temps les avait polis à la surface. Une pratique savante des idées et aussi l'indifférence qu'inspirait à chacun toute pensée étrangère à la sienne, leur communiquaient les dehors aimables de la tolérance. Mais on s'apercevait bien vite qu'ils étaient au fond divisés sur toutes les questions importantes, religion, État, société, art, qu'il ne subsistait entre eux d'autre lien moral que la prudence et l'indifférence.

Anatole France, *Pierre Nozière*, 1899

En écho aux grandes réalisations scientifiques et techniques des dernières décennies du XIX^e siècle, la Troisième République accomplit une profonde réforme de l'enseignement supérieur français. Cette réforme, qui vise notamment la formation de techniciens et ingénieurs pour l'industrie, entraîne un important développement des sciences appliquées dans les facultés des sciences. Le mouvement est largement soutenu par les municipalités et collectivités locales qui y voient une opportunité de développement économique. La recherche scientifique devient elle-même un enjeu, tandis que se mettent en place les premiers dispositifs nationaux de soutien, dispositifs que vient couronner en 1939 la création du CNRS. C'est à ce contexte, dans lequel s'inscrit la création des instituts électrotechniques, qu'est consacré ce chapitre.

2.1. L'enseignement supérieur sous la III^e République

La défaite militaire de 1870 face à la Prusse, et la perte consécutive de l'Alsace et d'une partie de la Lorraine, ont traumatisé la société française. Une raison majeure de cette défaite est alors attribuée à la défaillance des élites et aux insuffisances de l'instruction publique. La Troisième République naissante s'attelle alors à une transformation profonde de l'enseignement, passant en particulier par la reconstruction d'un système universitaire que la Révolution avait défait¹.

2.1.1. Renouveau des universités

La réforme est menée par un vigoureux directeur des enseignements supérieurs au ministère de l'Instruction publique et des Beaux-Arts, Louis Liard, qui occupera la fonction pendant dix-huit ans, de 1884 à 1902.

La situation financière des facultés est tout d'abord nettement améliorée. Leurs crédits sont plus que doublés entre 1875 et 1885, tandis qu'elles acquièrent la personnalité civile qui les autorise à posséder des biens et à recevoir dons, legs, et subventions de collectivités locales et de particuliers (décret Goblet, 1885). L'objectif du ministère est de créer, sur le modèle des universités allemandes, un petit nombre d'universités régionales fortes et plus autonomes. Les villes pressenties sont Paris, Bordeaux, Lille, Lyon, Nancy et Montpellier, le sort de Toulouse restant incertain. Ces universités devront associer à l'enseignement une véritable activité de recherche, ouverte aux entreprises. L'objectif de forte limitation du nombre d'universités est cependant contesté par les villes qui resteraient en dehors du mouvement et s'estiment de ce fait « méprisées ». Les protestations des élus locaux sont largement relayées par le Sénat. Dans le contexte général d'une grande foi dans le « Progrès », les institutions d'enseignement supérieur sont en effet perçues comme nécessaires au développement économique régional, du fait de leur pouvoir attractif sur des entreprises en quête de personnel qualifié.

¹ Prost (1968, p. 223-244) ; Shinn (1979) ; Paul (1985, chap. 1).

Les villes désireuses de s'attirer les faveurs du ministère s'engagent alors dans l'édification de « palais universitaires » destinés à offrir à leurs facultés, enfin, des conditions de travail dignes – ainsi en témoignent, à Toulouse, les bâtiments édifiés sur les allées Jules-Guesde en bordure du Jardin des Plantes. Cédant aux pressions, l'État constitue finalement en 1896 seize universités (dont une à Alger), par la réunification des anciens corps de facultés du ressort d'une même académie. Le nombre d'étudiants, resté très faible tout au long du XIX^e siècle, augmente rapidement. Pour l'ensemble des facultés des sciences françaises, il passe ainsi de 1335 en 1888, à près de 7 000 en 1913, et à plus de 13 000 en 1930².

2.1.2. Organisation des facultés

Des cours publics aux certificats. Jusqu'à la fin du Second Empire, les bancs des facultés voient peu d'étudiants. Entre 1822 et 1876, la faculté des sciences de Toulouse ne délivre que 88 licences de mathématiques, 57 de physique, et 23 d'histoire naturelle, soit trois licences par an³. Les professeurs trouvent un public plus nombreux dans les cours publics et gratuits qu'ils organisent, cours à caractère plus souvent mondain que scientifique et s'adressant par nature à un auditoire flottant et sans cesse renouvelé⁴. Ces cours s'effacent progressivement après 1870 pour laisser place à des formations plus structurées, s'adressant à des étudiants régulièrement inscrits et en quête d'un diplôme obtenu à l'issue d'un examen. L'octroi de bourses d'études, à partir de 1877, vient encourager le travail à plein temps de ces nouveaux étudiants.

Les universités créées en 1896 confèrent les grades d'État – licence et doctorat ès sciences – qui donnent accès à des fonctions et professions règlementées, et sont autorisées l'année suivante à délivrer leurs propres diplômes (diplômes d'ingénieur, doctorats d'université). Chacune d'entre elles est administrée par un conseil présidé par le recteur d'académie, où siègent notamment les doyens des facultés. Ces universités doivent néanmoins composer

² Prost (1968, p. 230).

³ Devaux (2020) ; Grossetti (1996b).

⁴ Prost (1968, p. 223-229).

avec des facultés fortes d'une large autonomie. Ces dernières sont elles-mêmes administrées par une assemblée des enseignants, qui arrête les programmes d'enseignement, et par un conseil des professeurs qui délibère sur les questions financières et les vacances de chaires.

La chaire, structure de base. Les facultés sont structurées autour de chaires professorales définies par une discipline académique (mathématiques, physique, mécanique rationnelle, etc.). Chaque titulaire de chaire – professeur – dispense l'enseignement relatif à un certificat d'enseignement supérieur (CES). La licence correspond ainsi à l'acquisition de trois certificats, laissés au choix de l'étudiant conformément à la tradition libérale de l'université française⁵. Dans les facultés des sciences, les plus recherchés sont les certificats de mathématiques générales, de sciences mathématiques, physiques et chimiques (MPC), et de physique générale.

L'enseignement d'un certificat comprend un cours magistral de trois heures par semaine, illustré par des expériences de cours présentées par un « préparateur », et complété par des travaux pratiques encadrés par un « chef des travaux ». À partir de 1877, un maître de conférences peut compléter les enseignements du professeur – trois leçons hebdomadaires d'une heure chacune, associées à des exercices. Les maîtres de conférences peuvent accéder, pour un nombre limité d'entre eux, au titre de « professeur adjoint » transformé en 1921 en « professeur sans chaire », qui leur permet de siéger au conseil de la faculté.

Pour le fonctionnement quotidien et l'entretien des locaux, les facultés disposent de rares personnels techniques (mécaniciens, etc.) et « garçons de laboratoire ». Une idée des missions de ces derniers est donnée par Henri Bouasse, professeur à la faculté des sciences de Toulouse, qui écrit à propos de l'entretien des accumulateurs électriques (dont le nombre mesure alors l'importance d'un laboratoire) :

Pour que vos accumulateurs durent et fonctionnent convenablement, il faut les soigner. Ne pouvant le faire vous-mêmes, il faut y déléguer un garçon. Au laboratoire de Physique de la Faculté des Sciences de

⁵ Prost (1968, p. 233). Un quatrième certificat sera requis à partir de 1947.

Toulouse, nous avons en tout deux aides qui doivent balayer, allumer les feux, faire les commissions, servir de préparateurs, etc., etc. : pouvons-nous leur imposer par surcroît le soin systématique des accumulateurs⁶ ?

Le « laboratoire ». Jusqu'aux années 1880, la recherche scientifique française se concentre dans quelques établissements parisiens (Collège de France, École normale supérieure, Muséum d'histoire naturelle, École pratique des hautes études) et quelques écoles d'ingénieurs (Polytechnique, Mines, Ponts et Chaussées). La grande majorité des chaires, à Paris comme en province, se consacrent quasi exclusivement au « haut enseignement ». Ce qu'on appelle le « laboratoire » est essentiellement le lieu des travaux pratiques des étudiants.

La situation évolue à la fin du siècle lorsque la recherche scientifique apparaît dans les critères d'activité évalués par le ministère. Dans le rapport annuel que tout recteur doit adresser à son ministre, les doyens doivent indiquer, pour chacune des chaires de leur faculté, les travaux réalisés (rapports imprimés, articles dans des revues savantes, communication à des colloques, etc.). Bien que les crédits dont disposent les professeurs demeurent très faibles, la recherche tend donc à se développer. Des étudiants licenciés y conduisent des travaux personnels, sanctionnés à partir de 1886 par un diplôme d'études supérieures (DES) confirmant leur aptitude à « faire du nouveau »⁷. Quelques travaux de recherche sont également menés par des « travailleurs libres », tels que professeurs de l'enseignement secondaire, fonctionnaires en détachement, personnels contractuels des ministères, ingénieurs de l'industrie, ou retraités.

Quant aux thèses de doctorat ès sciences, elles sont très peu nombreuses avant 1870 (cinq par an en moyenne, presque toutes Parisiennes), mais leur nombre augmente ensuite fortement : une vingtaine par an entre 1875 et 1900, dont un tiers en province – les facultés les plus

⁶ H. Bouasse, *L'organisation du travail scientifique en France*, préface au volume *Vision et reproduction des formes et couleurs de sa Bibliothèque scientifique de l'ingénieur et du physicien*, Delagrave, Paris (1917), p. xi.

⁷ Prost (1968, p. 233). Le DES sera progressivement exigé, à la fin du siècle, aux candidats aux agrégations.

actives étant celles de Lyon, Montpellier et Toulouse⁸. Les meilleures thèses préparées en province restent souvent soutenues à Paris, gage de qualité. Les bourses sont quasi inexistantes et d'un montant très faible.

2.2. Essor des sciences appliquées

2.2.1. Des facultés des sciences ouvertes

Du dernier tiers du XIX^e siècle à la veille de la Première Guerre mondiale, les facultés des sciences ouvrent de nombreuses formations techniques propres à favoriser l'innovation et la croissance de l'industrie⁹. Cette évolution correspond au souci des universitaires d'adapter leurs formations aux besoins de l'industrie régionale, évolution largement encouragée par les municipalités qui y voient un facteur d'attraction d'entrepreneurs et de dynamisme régional. C'est ainsi qu'à la faculté des sciences de Lille, créée en 1854, Louis Pasteur inaugure un cours sur la fermentation où se pressent les employés et cadres de l'industrie sucrière. À la faculté de Lyon, une école de chimie est ouverte en 1883 par Jules Raulin, tandis qu'à Nancy, Albin Haller crée quatre ans plus tard un institut chimique. Ainsi se créent au sein des facultés des instituts techniques dans le domaine de la chimie, de l'agriculture et de la mécanique. Il ne s'agit plus de simples cours publics adressés à un auditoire volatil, mais de formations professionnalisantes pour des étudiants régulièrement inscrits. En dépit de quelques résistances élevées au nom de la science « pure et désintéressée », notamment à la Sorbonne, le mouvement reçoit une large approbation interne. Les entrepreneurs, quant à eux, se montrent paradoxalement plus réservés : souvent peu diplômés, ils privilégient la promotion interne de leurs employés au recrutement de diplômés issus d'universités qu'ils ne connaissent pas bien.

À partir des années 1880, l'électricité devient la discipline la plus prisée par les étudiants des facultés des sciences. Les cours de physique lui font une place

⁸ Shinn (1979, p. 308) ; Paul (1985, p. 55) ; Pestre (1992, p. 225-228).

⁹ Grelon (1989).

grandissante, de nouveaux certificats dédiés sont ouverts, et l'électrochimie s'introduit dans les cours de chimie. La situation dans les écoles d'ingénieur est présentée dans la suite de cette section, tandis que les instituts électrotechniques créés au tournant du siècle font l'objet des chapitres suivants.

2.2.2. L'électricité dans les écoles d'ingénieurs

Comparée à la rapidité des innovations liées l'électricité au cours du XIX^e siècle, l'introduction de la discipline dans les écoles d'ingénieurs apparaît *a contrario* bien lente, notamment au regard de ce qui se passe à l'étranger¹⁰. On en présente ici un bref panorama.

L'École centrale de Paris. Illustration de la relative lenteur de la pénétration de l'enseignement de l'électricité dans les écoles supérieures, l'École centrale de Paris, fondée en 1829, n'envoie aucun enseignant à l'Exposition internationale de 1881 – plusieurs de ses ingénieurs ont pourtant contribué à l'essor de la discipline, tels Georges Leclanché avec la mise au point d'une pile performante ou Édouard Hospitalier dans la préparation de l'Exposition. L'enseignement de l'électricité, initialement assuré par le professeur de physique, prend son autonomie en 1885 avec la création d'une maîtrise de conférences, transformée en chaire neuf ans plus tard.

L'École supérieure de télégraphie. La couverture du territoire national d'un réseau de télégraphes électriques, sous le Second Empire, est l'œuvre d'une administration spécifique qui forme alors ses propres ingénieurs. Cette formation est transformée en 1878 en une École supérieure de télégraphie, à l'instigation d'Adolphe Cochery, directeur d'un service des Postes et Télégraphes transformé l'année suivante en ministère à part entière. L'école, qui comprend deux années de scolarité, se distingue par la qualité de ses cours d'électricité et d'électromagnétisme. Elle devient école d'application de Polytechnique et alimente un corps d'État d'ingénieurs des Télégraphes. Elle s'est perpétuée jusqu'à aujourd'hui sous différentes dénominations, la dernière étant Télécom Paris.

¹⁰ Grelon (2006) ; Nio (2020, chap. 5-8).

L'École de physique et chimie industrielles de Paris. La défaite de 1870 entraîne le passage en territoire allemand de la ville de Mulhouse qui abrite alors la principale école de chimie française. Cette circonstance et l'importance industrielle de la chimie contribuent à la création en 1882 de l'École municipale de physique et chimie industrielles de Paris¹¹. L'initiative en revient au chimiste Charles Lauth, ardent partisan de la création d'une école nationale, qui, découragé par les tergiversations du ministère du Commerce, s'est tourné vers la municipalité de Paris – dont il est un ancien élu. L'électricité y est initialement enseignée par Édouard Hospitalier, ingénieur centralien chargé du cours de physique, assisté par Pierre Curie, préparateur puis chef des travaux. Cet enseignement est renforcé en 1894 lorsque Curie est nommé sur une nouvelle chaire de physique générale. Les travaux pratiques y occupent une place très importante : 75 séances d'électricité générale en deuxième année (soit 201 heures) et 251 séances d'électricité industrielle en troisième année (703 heures), auxquelles s'ajoutent 36 séances d'électrochimie (100 heures). L'école forme une trentaine d'ingénieurs par an – dont trois quarts de chimistes et un quart de physiciens. Curie, démissionnaire en 1905, est remplacé par Paul Langevin, par ailleurs nommé, la même année, adjoint au directeur de l'école Albin Haller.

L'École supérieure d'électricité. Les importants bénéfices de l'Exposition internationale d'électricité avaient permis la création, effective en 1888, d'un Laboratoire central d'électricité (cf. chap. 1). Éleuthère Mascart, qui en préside la commission administrative, s'emploie dans les années suivantes à créer au sein de ce laboratoire une école destinée à spécialiser dans le domaine de l'électricité des ingénieurs déjà diplômés¹². L'École ouvre en 1894. Pour diriger l'ensemble formé par le laboratoire et son école d'application, Mascart fait appel à un jeune normalien de 31 ans, Paul Janet. Celui-ci, qui vient d'être nommé chargé de cours à la Sorbonne, est déjà réputé dans les milieux électriciens pour avoir brillamment initié, deux ans auparavant, l'enseignement de l'électricité industrielle à Grenoble (cf. chap. 3).

¹¹ Grelon (1991*b*, p. 806-808) ; Shinn (1981).

¹² Grelon (1991*b*, p. 832-845).

En 1896, l'École, devenue financièrement autonome, est rebaptisée École supérieure d'électricité (ESE, ou « Supélec »). Sa politique scientifique est élaborée par un conseil de perfectionnement où siègent des membres de la Société des électriciens et le directeur de l'École centrale des arts et manufactures. Janet tient à un lien fort avec cette école qui lui garantit un flux de bons ingénieurs. Mais en retour, l'École centrale voudrait contrôler étroitement son « école d'application », pour en faire une sorte de quatrième année de spécialisation dispensant une formation pratique, sur le modèle de l'Institut Montefiore de Liège (Belgique). Des tensions s'ensuivent, mais Janet parvient à maintenir le cap d'une formation à la fois théorique et pratique. Les enseignements se structurent ainsi autour de son propre cours d'électrotechnique générale et du cours de Henri Chaumat (directeur-adjoint de l'école) sur les mesures électriques, tandis que les applications sont déléguées à des conférenciers. Pour l'année 1897-1898, plus de cinquante conférences sont ainsi données, portant sur l'électrochimie (8 conférences), les accumulateurs (4), la téléphonie (3), la télégraphie (4), les applications de l'électricité aux chemins de fer (3), les dynamos (4), les essais mécaniques (15), les canalisations et installations électriques (6), les alternateurs et transformateurs (6), et la construction des machines (5). La formation, qui vise l'acquisition de « l'art de la débrouillardise », comprend également la réalisation de cinq projets, des travaux d'atelier et des visites d'usines. Une « excursion électrotechnique », en France ou en Suisse, est proposée à partir de 1899 aux élèves les plus fortunés. La part des travaux pratiques dans la formation est importante, supérieure à celle des cours – en 1914, on compte 492 heures de travaux pratiques pour 300 heures de cours.

Le recrutement vise en particulier les polytechniciens, les centraliens et les ingénieurs des Mines et des Ponts, recrutés sans examen. Les ingénieurs des Arts et Métiers (les « gadzarts ») et licenciés des facultés des sciences sont quant à eux soumis à un examen d'entrée, ainsi que les diplômés de l'École supérieure de l'aéronautique (Supaéro) et des instituts électrotechniques. On compte également parmi les élèves quelques officiers des ministères de la Guerre et de la Marine, et quelques ingénieurs des Télégraphes. Le nombre d'élèves croît de façon importante – une centaine à partir de 1905 – et des

travaux d'agrandissement deviennent nécessaires ainsi que des recrutements de personnels. La Société des électriciens restant farouchement attachée à l'indépendance de l'école vis-à-vis de l'État – au point de s'opposer à une proposition de loi qui aurait permis à celui-ci de la subventionner –, le financement de l'extension, qui doit donc rester privé, nécessite un recours à l'emprunt.

Le diplôme décerné est initialement spécifique à l'établissement. La demande de Janet que ce diplôme corresponde à un titre d'ingénieur électricien, soutenue par les élèves, est cependant repoussée par le conseil. Les chefs d'industrie préfèrent en effet un diplôme d'ancien élève d'une institution réputée élitiste, et qu'ils connaissent, à un titre d'ingénieur que délivrent de nombreuses formations hétérogènes. Janet parvient finalement, en 1904, à faire plier le conseil : la formation sera désormais sanctionnée par un diplôme d'ingénieur de l'ESE.

Paul Janet (1863-1937)

Né le 10 janvier 1863 à Paris dans une famille de grands universitaires^a, normalien et agrégé de sciences physiques (1886), docteur de la faculté des sciences de Paris (1890) avec une thèse sur le magnétisme, Janet débute sa carrière en 1886 comme chargé de cours à la faculté des sciences de Grenoble. Il y inaugure en 1892 un cours pionnier d'électricité industrielle. Nommé deux ans plus tard chargé de cours à la Sorbonne, il est alors appelé par Éleuthère Mascart à la direction du Laboratoire central et de l'École supérieure d'électricité (Supélec). Professeur de physique en 1901, il obtient en 1922 la chaire d'électrotechnique qu'il conserve jusqu'à sa retraite en 1934.



Il est élu à l'Académie des sciences en 1919 et nommé commandeur de la Légion d'honneur en 1927 à l'occasion de l'inauguration des nouveaux bâtiments de Supélec. Membre du Comité international des poids et mesures à partir de 1931, membre de trois académies étrangères et honoré de nombreuses distinctions, Paul Janet meurt à Malakoff le 21 février 1937. Très respecté tant du côté académique que du côté industriel, il aura beaucoup compté dans le développement de Supélec. Son père, Paul Janet, est un philosophe renommé.

^a. Charle & Telkès (1989, p. 159-161) ; de Broglie & Maurain (1937).

Le décès en 1908 de Mascart, grand protecteur de l'école, marque le début d'une période troublée. Un conflit se déclare notamment avec le directeur de Centrale, qui considère que la durée de la spécialisation – un an – retarde trop l'entrée des ingénieurs dans la vie active, et devrait être réduite à quelques mois. Janet, soutenu par Gustave Eiffel (président de la Société des ingénieurs civils de France), obtient finalement gain de cause avec la proposition d'un nouvel enseignement de télégraphie sans fil (TSF), sur trois mois, de nature à donner un éclat particulier à l'école¹³. Cet enseignement ouvre en 1911 et, confié au commandant Gustave Ferrier, pionnier de la TSF, il connaît un grand succès.

Le dynamisme et la réputation de l'ESE se confirment après la Première Guerre mondiale¹⁴. L'enseignement de radiotélégraphie est transformé en section de radio-électricité, au côté d'une nouvelle section d'éclairage. L'accroissement des effectifs – 240 élèves pour la 28^e promotion en 1922, dont une femme – incite Janet à élaborer un ambitieux projet de réinstallation de l'école dans de nouveaux bâtiments, à Malakoff. La souscription lancée auprès des compagnies industrielles (et de la Ville de Paris) ne permettant pas de boucler le budget, l'État est cette fois sollicité et la Chambre des députés vote le crédit attendu. Les liens avec l'État se sont en effet renforcés notamment avec le rattachement, en 1919, du cours d'électrotechnique de Janet à la faculté des sciences de Paris – rattachement qui témoigne, au passage, de l'ouverture grandissante de la Sorbonne pour les sciences appliquées, et de l'ouverture d'esprit de la Société des électriciens qui finance les dépenses supplémentaires engagées. La nouvelle école est inaugurée en novembre 1927 par le Président de la République Gaston Doumergue, accompagné de deux ministres et des ambassadeurs de 23 pays.

L'Institut industriel du Nord (IDN). En province, deux écoles inaugurent tôt des enseignements d'électricité industrielle : l'Institut industriel du Nord (IDN) et l'École centrale Lyon (ECL)¹⁵. Le premier est fondé en 1872 par le département du Nord et la ville de Lille, sur le modèle

¹³ Grelon (1991b, p. 842-843).

¹⁴ Grelon (1995).

¹⁵ Grelon (1991b, p. 806-832).

de l'institut de Mulhouse et de l'Institut Montefiore de Liège. Il comporte une année préparatoire à laquelle fait suite une année généraliste puis deux années de spécialisation, en mécanique, chimie, ou filature et tissage. En 1892, Bernard Brunhes, maître de conférences à la faculté des sciences, y ouvre une nouvelle section d'électricité industrielle, puis crée deux ans plus tard un cours public semestriel de physique industrielle à l'institut de physique de la faculté. Brunhes quitte Lille en 1895 et ses cours sont repris par Charles Camichel – futur directeur de l'institut électrotechnique de Toulouse. Camichel met sur pied un laboratoire et inaugure l'année suivante, à la faculté, les enseignements d'un nouveau certificat de physique industrielle. En 1899, la moitié des diplômés de l'IDN sort de la section d'électricité. À partir de 1900, cette section accueille également des élèves déjà diplômés, chimistes ou mécaniciens, qui souhaitent y compléter leur formation par une quatrième année d'études et acquérir un diplôme d'électricité.

L'École centrale Lyon (ECL). Établissement privé fondé en 1857 et passé en 1888 sous la tutelle de la chambre de commerce, l'École centrale Lyon (ECL) offre en deuxième année un cours d'électricité générale et en troisième année deux cours plus appliqués, d'électrotechnique et de mesures électriques. Une quatrième année optionnelle propose une spécialisation dans les constructions civiles ou dans l'électrotechnique. Les enseignements communs aux deux sections sont l'aménagement des chutes d'eau, le transport de l'électricité, les turbines à vapeur, l'aménagement des centrales électriques, et les applications de l'électricité à la traction, aux machines-outils et aux appareils de levage. Les enseignements spécifiques à la section d'électrotechnique portent sur les mesures physiques, les machines à courant continu et les alternateurs, les canalisations souterraines, l'électrochimie et l'électrometallurgie, et la photométrie. Par cette quatrième année de spécialisation, l'École centrale Lyon prend l'avantage sur son aînée parisienne, qui n'offrira que plus tard une formation équivalente.

Les Écoles nationales d'arts et métiers. Les Écoles nationales d'arts et métiers forment depuis la fin du XVIII^e siècle les ouvriers qualifiés et contremaîtres de l'industrie. Au tournant du XX^e siècle elles sont au nombre de quatre, à

Châlons-sur-Marne, Angers, Aix-en-Provence et Cluny. Leurs anciens élèves, les « gadzarts », sont présents dans toutes les branches industrielles du pays et constituent une main d'œuvre recherchée. L'un des leurs, Hippolyte Fontaine, a fondé la Chambre syndicale des électriciens. L'électricité y est enseignée à partir de 1882 sous la forme d'un cours complet. À l'issue de leur formation, de nombreux gadzarts prolongent leurs études à l'École supérieure d'électricité. L'élévation du niveau de formation conduit ces écoles à délivrer un brevet d'ingénieur à partir de 1907.

L'essor des écoles privées. Le besoin de main-d'œuvre dans l'industrie électrique – compagnies de distribution, fabricants d'appareillages, ateliers d'électromécanique – entraîne l'apparition de nombreux cours techniques et de conférences publiques, à Paris et dans sa banlieue¹⁶. Le cours public de Marcel Deprez au Conservatoire national des arts et métiers, notamment, connaît un succès considérable. Quatre écoles privées se distinguent, connues sous le nom d'écoles Charliat, Violet, Breguet et Sudria. Créées au tournant du siècle pour la formation de contre-maîtres, ces écoles se posent en intermédiaires entre les écoles professionnelles d'arts et métiers, et les écoles supérieures d'enseignement technique. Elles n'exigent pas de diplôme pour l'admission.

L'école Charliat, fondée par Alexandre Charliat, ingénieur des Arts et Manufactures, ouvre en 1901. L'École Violet, du nom de la rue où elle s'installe, ouvre la même année. L'un de ses fondateurs, Charles Schneider, professeur de lycée, la quitte peu après pour créer l'École Breguet, dont le nom rend hommage à Louis François Clément Breguet¹⁷. La quatrième école est fondée en

¹⁶ Grelon (1991b, p. 824-832).

¹⁷ Louis François Clément Breguet (1804-1883) reprend l'entreprise familiale, très réputée, de fabrication d'instruments scientifiques. Il s'illustre notamment par l'invention du miroir tournant utilisé en 1850 par Foucault et Fizeau pour mesurer la vitesse de la lumière. Il invente également un télégraphe utilisé par les chemins de fer ; à l'origine du premier réseau public d'horloges électriques, il brevète la pendule à diapason. Membre du Bureau des Longitudes, il est élu à l'Académie des sciences en 1874 – son grand-père l'avait été en 1816. L'un de ses fils, Antoine, sera un ingénieur électricien célèbre et son petit-fils Louis sera un pionnier de l'aviation.

1905 par Joachim Sudria, transfuge de l'école Charliat. Polytechnicien et ingénieur Supélec, il est également professeur de mécanique rationnelle à l'Institut catholique de Paris. Ces écoles préparent leurs meilleurs élèves au concours d'entrée à l'École supérieure d'électricité. Elles fondent leur réputation sur une discipline stricte et sur des jurys sans complaisance – un tiers des élèves est recalé à l'examen terminal.

À ces quatre établissements s'ajoute en 1905 une section d'électricité à l'École spéciale du bâtiment, des travaux publics et de l'industrie. Cette école privée, fondée par Léon Eyrolles, connaît un succès considérable pour ses cours par correspondance. Eyrolles, lauréat de la médaille d'Or de la Société d'encouragement à l'industrie nationale, porte haut sa vocation sociale vis-à-vis des « enfants des défavorisés de la fortune ». Très exigeante, cette école ne délivre que 1 % de ses élèves.

En province, s'ouvre en 1908 à Marseille une École d'électricité industrielle – qui deviendra plus tard l'École supérieure d'ingénieurs de Marseille (ESIM). À Lille, l'École des hautes études industrielles des facultés catholiques de Lille (fondée en 1885 avec l'appui des chefs d'entreprise) forme en deux ans les cadres de l'industrie régionale. Une troisième année de « cours pour ingénieurs » est créée en 1891. Aimé Witz, correspondant de l'Académie des sciences, y enseigne la physique et l'électricité industrielle. La section d'études commerciales prend bientôt son autonomie (elle deviendra l'EDHEC en 1921), tandis qu'une section d'électricité ouvre en 1912, créée par le chanoine Witz (fils d'Aimé), qui forme en deux ans des ingénieurs électriciens après une année commune avec la section industrielle générale.

Ces écoles privées, soucieuses de qualité des cours et ouvrant même des laboratoires, font généralement preuve d'un grand dynamisme. Elles ne reçoivent cependant qu'un faible soutien des entreprises qui pourtant y trouvent la main d'œuvre qualifiée dont elles ont de plus en plus besoin. Cette main d'œuvre est même insuffisante, problème qui touche l'ensemble de la formation professionnelle à l'échelle nationale. Afin de remédier au problème, un projet de loi de réorganisation de l'enseignement technique, industriel et commercial, est soumis en 1905 par le sénateur Placide Astier. La loi Astier, premier texte organique réglementant l'ensemble de l'enseignement technique, est votée en 1919 – la loi

transforme notamment le certificat de capacité professionnelle, créé en 1911, en certificat d'aptitude professionnelle (CAP).

2.3. L'entre-deux-guerres

2.3.1. Un contexte national en dents de scie

L'élan de la grande réforme des années 1890, qui a conduit à une augmentation importante du nombre d'étudiants, est brisé par la Première Guerre mondiale. La France perd alors 10 % de sa population active, et le tribut payé par les intellectuels – instituteurs, diplômés de l'enseignement supérieur, artistes – est particulièrement lourd¹⁸. Les infrastructures et les capacités de production sont fortement affectées – en 1921, les Français produisent moins qu'en 1891, trente ans plus tôt. Pour financer la reconstruction, l'État poursuit une politique, engagée dès 1914, d'émission considérable de monnaie – on fait tourner la planche à billets. Cette politique, préférée à l'augmentation des impôts ou à l'emprunt, entraîne inflation et dévaluations qui limitent les capacités d'investissement. Les prix en 1928 sont ainsi six fois supérieurs à ceux de 1914, hausse qui affecte fortement le niveau de vie des fonctionnaires dont les salaires ne suivent pas. La reprise économique et industrielle des années 1920 est cependant vigoureuse, confortée par la stabilisation du franc réalisée à la fin de la décennie par Raymond Poincaré – le budget de l'État est même excédentaire de 1926 à 1930. La production d'électricité décuple entre 1913 et 1929, celle de fonte et d'acier double, et l'industrie automobile, qui construit 250 000 véhicules en 1929, s'impose comme la première d'Europe. La crise économique mondiale du début des années 1930 n'épargne cependant pas le pays, qui est durement frappé à partir de 1932 par les faillites et le chômage de masse. Le niveau industriel atteint par la France en 1929 ne sera retrouvé que dans les années 1950.

¹⁸ Duby (1970, p. 524-533).

Les difficultés financières du début des années 1930 affectent naturellement les universités, dont l'État tend à se désengager au profit d'autres secteurs de l'économie. Ce désengagement est aggravé par la chute du nombre d'étudiants consécutive à la guerre, chute qui entraîne celle de la ressource des droits d'inscription et de travaux pratiques de laboratoire. Les universités profitent cependant de l'embellie économique de la fin de la décennie et voient salaires et subventions augmenter. Elles ne sont pas trop affectées par la crise du début des années 1930 et conservent la relative aisance acquise précédemment.

2.3.2. La recherche, nouvelle priorité nationale

De la promotion des « inventions » au soutien à la recherche. La réforme de la fin du XIX^e siècle permet à la recherche scientifique, jusque-là concentrée dans quelques établissements parisiens, de se développer non seulement à Paris mais aussi dans les nouvelles universités régionales. Une Caisse des recherches scientifiques (CRS), premier dispositif national de ce type, est créée en 1901, visant à « aider les savants capables de réaliser les découvertes appelées à délivrer l'humanité des fléaux qui la déciment »¹⁹, fléaux qui s'appellent alors catastrophes minières, épidémies, eaux insalubres ou phylloxéra. Le budget de cette Caisse reste toutefois très faible, nettement inférieur à celui que les fondations privées – telles que l'Institut Pasteur – consacrent à la recherche.

Un autre dispositif d'aide à la recherche naît en 1915 dans le contexte d'une forte mobilisation des scientifiques au service de la Patrie en danger. Paul Painlevé, ministre de l'Instruction publique, crée cette année-là une direction des inventions intéressant la Défense nationale, rattachée à son ministère. Militaires et scientifiques s'y côtoient, notamment à la Commission d'expériences de l'artillerie navale de Gâvre, dans le Morbihan, pour des études de balistique²⁰. C'est aussi dans ce contexte que le physicien Paul Langevin se distingue par ses travaux sur

¹⁹ Cité par Guthleben (2013, p. 14).

²⁰ Pour la Commission de Gâvre (ou Gâvres), cf. Aubin (2017).

la détection acoustique des sous-marins et met au point le premier « sonar ».

La direction des inventions est transformée en 1922 en Office national des recherches scientifiques, industrielles et des inventions (ONRSI), dirigé jusqu'en 1937 par le député socialiste Jules-Louis Breton. Cet Office, financé par les recettes du Salon des arts ménagers et par quelques subventions de ministères, s'attache à promouvoir des « inventeurs », mais ne cherche pas à mettre sur pied de véritable politique de recherche. La lettre reproduite ci-dessous, adressée par Breton au lauréat de 1931 de la médaille d'Or de l'Office – Charles Baron, député, ingénieur des Poudres, président de la Commission des Mines –, en témoigne :

La Conférence [des présidents des comités techniques de l'ONRSI] a tenu ainsi à rendre un hommage tout particulier à l'activité scientifique dont vous avez fait preuve depuis plus de trente ans et qui s'est traduite par des découvertes importantes dans les domaines les plus variés. Elle a retenu notamment vos travaux sur la graisse de suint pour la fabrication de la lanoline, sur le collage du papier en pile par le résinate de soude et votre procédé de trempe des aciers par les hydrocarbures. [...] Enfin, la Conférence s'est souvenue que votre activité scientifique s'accompagnait du plus haut désintéressement dont vous avez donné la preuve en abandonnant à l'État des découvertes aussi importantes que votre procédé d'ensimage des laines pour l'imperméabilisation des draps employés aux armées pendant la guerre, et votre procédé de stabilisation des explosifs²¹.

L'Office n'oubliant pas ses origines de temps de guerre, ses préoccupations resteront très liées aux sollicitations du ministère de la Guerre²². L'ONRSI permet toutefois une grande réalisation, œuvre du physicien Aimé Cotton : le « grand électro-aimant » de Meudon-Bellevue. Inauguré en 1928, cet électro-aimant sera le cœur d'un laboratoire fleuron de la recherche française.

²¹ J.-L. Breton à Ch. Baron, 19 janv. 1931. Arch. nat. F17 17492.

²² J.-L. Breton, Note relative à l'Office National des Recherches Scientifiques & Industrielles & des Inventions, 7 nov. 1937, Arch. nat. F17 17492.

La promotion des inventions ne peut toutefois tenir lieu de politique de recherche. Celle-ci souffre tant de la faiblesse des subventions que du peu d'attractivité des carrières universitaires, situation aggravée par la forte inflation de l'après-guerre. La situation est particulièrement douloureuse pour le personnel de laboratoire dont le salaire annuel (1 200 francs en 1925) correspond à moins du tiers de celui des manœuvres, catégorie la moins payée des ouvriers. Les rémunérations d'un préparateur (14 000 francs) ou d'un professeur (24 000 à 28 000 francs selon le grade) sont de même très inférieures aux salaires offerts par l'industrie à qualification égale²³.

Une amorce de reconnaissance nationale s'esquisse en 1925 à l'occasion du vote par l'Assemblée nationale de la taxe d'apprentissage. Le député et mathématicien Émile Borel, proche de Painlevé, obtient alors qu'une partie de cette taxe soit destinée aux laboratoires. Cette « subvention Borel » est une véritable manne, concédant enfin aux laboratoires un peu d'aisance pour des achats de matériel et la rétribution de quelques personnels auxiliaires²⁴. Entre 1926 et 1933, elle croît de quatre à neuf millions de francs, avant de décroître du fait de la crise économique. La première bénéficiaire en est l'université de Paris, qui en perçoit le quart. Le laboratoire de mécanique physique de Gabriel Koenigs, un des plus importants de la faculté des sciences, reçoit ainsi 100 000 francs en 1929. Les crédits sont répartis selon un principe égalitaire, d'où résulte leur émiettement sur un grand nombre de laboratoires. Jaloux de son indépendance, un professeur tolérerait mal que les moyens qu'on lui attribue soient liés à la qualité ou à l'utilité sociale de ses travaux, dont il s'estime le seul juge.

De la Caisse nationale des sciences au CNRS. Au terme d'une décennie d'appauvrissement, et à la faveur de la prospérité retrouvée de la fin des années 1920, les années 1930 voient une nette amélioration de la situation universitaire. Les salaires retrouvent ainsi en 1932 leur niveau de 1913. La crise économique mondiale qui atteint alors la France ne les affecte pas trop et n'ampute

²³ Pestre (1992, p. 315, note 6).

²⁴ Guthleben (2013, p. 15) ; Pestre (1992, p. 236).

pas trop non plus les subventions – quelques chaires sont néanmoins supprimées²⁵. La décennie 1930 voit surtout émerger l'idée, vigoureusement portée par Jean Perrin (1870-1942), que la recherche représente un enjeu national méritant une politique propre. La création en 1930 de la Caisse nationale des sciences (CNS), dont la mission est de financer la retraite des savants, témoigne d'une première reconnaissance de cet enjeu²⁶. Perrin obtient quelques mois plus tard que cette mission soit élargie au financement de bourses de chercheurs à temps plein, par une ponction du budget de construction de la Ligne Maginot. En réalité, les deux tiers des bourses allouées iront plutôt arrondir le salaire des personnels titulaires – chefs de travaux, maîtres de conférences et professeurs. Ce détournement profitera cependant indirectement à la recherche en limitant le recours fréquent au cumul d'emplois.

Après la CNS, vient en 1933 la création d'un Conseil supérieur de la recherche scientifique, structure consultative pour l'affectation des moyens. Ce Conseil comprend huit sections, dont une de mécanique. Une limite d'âge de 70 ans est posée comme condition d'éligibilité, mesure révolutionnaire !

En 1935, une unique Caisse nationale des recherches scientifiques (CaNRS) rassemble l'ancienne caisse (CRS) et la nouvelle (CNS), et voit son budget fortement augmenter. Les bourses pour les étudiants sont revalorisées. L'année suivante, l'arrivée au pouvoir du Front populaire de Léon Blum accélère les choses : un sous-secrétariat d'État à la Recherche est créé, confié à Irène Joliot-Curie – première femme à obtenir un portefeuille ministériel – puis à Perrin. Un nouveau Service central de la recherche scientifique prend le contrôle de la CaNRS et finance des boursiers, chargés de recherche, maîtres de recherche et directeurs de recherche ; il attribue également des crédits réguliers aux laboratoires universitaires et, fait nouveau, à des laboratoires spécialisés qui lui sont directement rattachés. Afin de rassurer des universitaires un peu inquiets de l'intrusion de cet organisme conçu hors des cadres habituels, sa direction est confiée à un professeur d'université, le physiologiste Henri Laugier.

²⁵ Pestre (1992, p. 280).

²⁶ Guthleben (2013, p. 15-26) ; Pestre (1992, p. 253-254).

L'Office national des recherches scientifiques, industrielles et des inventions (ONRSI) disparaît lors de la création, en mai 1938, du Centre national des recherches scientifiques appliquées (CNRSA), dont Jean Zay confie la direction au minéralogiste Henri Longchambon²⁷. Dans un contexte politique fortement tendu avec l'Allemagne, la tâche majeure du CNRSA est alors l'organisation de la mobilisation scientifique du pays : recensement du personnel de recherche des universités et des établissements scientifiques, inventaire des ressources des laboratoires, stimulation de recherches intéressant la défense nationale, et planification d'un repli général vers le sud de la France lorsque les circonstances l'exigeront²⁸. Le CNRSA soutient des programmes de recherche tels que celui de Joseph Pérès et Lucien Malavard sur des calculs d'aérodynamique, à l'institut de mécanique de l'université de Paris, et celui de Yves Rocard sur le développement des hyper-fréquences pour le radioguidage des avions.

Consécration des efforts de la décennie, le Centre national de la recherche scientifique (CNRS) est créé le 19 octobre 1939, fusionnant le Service central et le Conseil supérieur, par un décret du président de la République Albert Lebrun²⁹. Le CNRSA en devient la « section appliquée ». Le contexte national est dramatique : la France a déclaré la guerre à l'Allemagne six semaines plus tôt.

2.3.3. Création des instituts d'université

Insuffisances de la loi de 1896. La loi de 1896 encourageait les facultés à créer des instituts annexes mais sans cadrage institutionnel précis. La multiplication de ces instituts et l'hétérogénéité des diplômes délivrés font bientôt apparaître la nécessité d'une harmonisation nationale. Les questions les plus débattues portent sur leur autonomie budgétaire, sur le statut des enseignants auxiliaires recrutés pour les enseignements techniques (ingénieurs, etc.), et sur la reconnaissance des diplômes.

²⁷ Picard (2022, §III) ; Guthleben (2013, p. 17).

²⁸ Arch. nat. AJ16 5822 ; rapport A. Ranc, janv. 1940, Arch. nat. 19800284 53.

²⁹ Guthleben (2013, p. 29-32).

Le projet de loi Pottevin. Le débat arrive sur le devant de la scène en juillet 1918 avec un projet de loi soumis par le député Henri Pottevin³⁰. Ce projet de loi propose l'institution d'« instituts des sciences appliquées » sous la bannière desquels pourraient se ranger les instituts et écoles existants ainsi que les instituts futurs. Ces instituts organiseraient, outre l'enseignement proprement dit, des services de recherche et des écoles professionnelles. Chaque institut, financièrement autonome, serait administré par un conseil de direction ayant les attributions des conseils des facultés. Un conseil de perfectionnement, incluant industriels et représentants des pouvoirs locaux (élus, chambre de commerce...), délibérerait sur les programmes et l'orientation générale de l'enseignement, ainsi que sur les opérations effectuées pour le compte de l'industrie. Le directeur et les professeurs seraient nommés par le ministre sur proposition du conseil de direction et du conseil de perfectionnement ; deux catégories de professeurs seraient distinguées : des professeurs de sciences générales soumis aux exigences des facultés, et des professeurs techniciens qui ne seraient tenus à aucune obligation de grade universitaire. Les instituts délivreraient des diplômes d'ingénieur, au nom de l'État, et pourraient conférer le grade de docteur ès sciences appliquées. Un comité consultatif de l'Enseignement technique et professionnel, créé au ministère de l'Instruction publique, serait chargé d'éclairer le ministre sur toutes les questions intéressant l'enseignement des sciences appliquées. Un crédit serait inscrit au budget du ministère pour constituer un fonds de réserve affecté à l'organisation des instituts et au financement de bourses d'études.

Accueil du projet par les instituts et par Charles Camichel. Le projet de loi Pottevin, favorablement accueilli par les universitaires, donne à Charles Camichel, directeur de l'institut électrotechnique de Toulouse, l'opportunité d'exprimer ses vues sur la question dans une

³⁰ Henri Pottevin (1865-1928), normalien, docteur en médecine, professeur d'hygiène au CNAM. Député de la gauche démocratique, radicale et radicale-socialiste de 1914 à 1920, puis sénateur. Spécialiste reconnu de l'enseignement technique, de la recherche scientifique, et de l'hygiène publique.

tribune publiée en 1919 par la *Revue générale des sciences pures et appliquées*³¹. Dans cette tribune, Camichel souligne tout d'abord que si la loi de 1896 a bien permis la création et le développement des instituts techniques universitaires, l'importance acquise par ces instituts a fait apparaître deux « anomalies », la première se rapportant aux diplômes délivrés et la seconde aux ressources de ces instituts. Sur le premier point, Camichel milite pour que les diplômes d'ingénieur délivrés correspondent à des grades d'État (donnant accès à des fonctions et professions) et non à des diplômes d'université (de nature purement scientifique). Sur le second point, Camichel indique que si l'État a laissé aux universités le produit des droits d'inscription et de travaux pratiques, ces ressources sont tout à fait insuffisantes pour la fondation d'établissements « particulièrement coûteux par leur nature même ». Ainsi, les instituts n'auraient pu se développer « s'ils n'avaient trouvé autour d'eux des aides précieuses », et Camichel cite ici, pour son institut, la municipalité de Toulouse.

Puis Camichel examine les points du projet de loi intéressant plus directement les instituts de mécanique appliquée et d'électricité industrielle. Sur l'organisation générale, Camichel remarque que les instituts possèdent déjà un budget autonome, qu'ils ont un conseil de perfectionnement ainsi que des locaux propres, si bien que la nouvelle loi ne ferait que reconnaître leur autonomie – analogue à celle des observatoires. Sur l'enseignement et les examens, Camichel juge que la durée actuelle des études – une année pour les sciences générales suivie de deux années de sciences appliquées – est insuffisante pour donner aux étudiants « l'ensemble des connaissances générales qu'ils ne pourront guère acquérir après leur sortie de l'université, lorsqu'ils seront absorbés par leurs occupations journalières ». Il milite donc pour l'instauration d'une quatrième année, qui alignerait la durée des études sur celle des élèves de l'École centrale (où une année préparatoire de mathématiques spéciales précède les trois ans d'école). « L'enseignement des universités doit-il être moins complet que celui de l'École Centrale ? Je ne le crois pas. » L'étudiant entrerait alors dans l'industrie à l'âge de 24 ou 25 ans, après le service militaire.

³¹ Camichel (1919a).

Pour l'enseignement des sciences théoriques et de technique générale, le choix de professeurs de faculté s'impose :

En exécutant des recherches sur des sujets se rattachant à l'industrie, ils se tiendront forcément au courant des progrès de celle-ci et pourront orienter, en vue des applications, l'enseignement général qu'ils donnent. L'industrie ne fournit-elle pas en Mécanique et en Électricité, par exemple, les meilleures données numériques devant figurer dans un cours de sciences générales destiné à de futurs ingénieurs ?

L'enseignement des sciences appliquées serait quant à lui assuré par des ingénieurs en activité, comme c'est déjà le cas dans les instituts actuels. Comme Pottevin, Camichel attache la plus grande importance aux travaux pratiques de laboratoire, une des plus fortes raisons du succès des instituts. À ce propos,

on a critiqué l'emploi de machines puissantes pour l'enseignement. Cette opinion provient d'une connaissance incomplète de la question. La règle que nous avons adoptée à Toulouse est la suivante : la machine choisie doit être le modèle industriel (modèle de série) de puissance minimum ; par exemple, on désire mettre entre les mains des élèves une machine compound à vapeur surchauffée d'un modèle courant : on adoptera une puissance d'une centaine de chevaux [75 kilowatts] parce que des machines moindres n'existent pas dans l'industrie et qu'il serait nécessaire, si l'on voulait réaliser un modèle de puissance moindre, de faire construire un type spécial qui n'aurait pas les qualités qu'on utilise dans de pareilles machines. On serait donc amené à donner aux élèves des idées fausses.

Camichel prend ici l'exemple d'une dynamo fonctionnant comme générateur ou comme moteur, l'égalité des rendements dans les deux cas n'étant réalisée que si la machine a une puissance suffisante. Il est en outre utile, poursuit-il, de faire étudier par les élèves le fonctionnement de machines défectueuses ou mal réglées. « Lorsque l'étudiant devenu ingénieur les rencontrera dans un essai, il pourra diagnostiquer immédiatement quelle en est la cause. » Ces façons d'envisager les travaux pratiques

sont proches de celles que promeuvent les *Technische Hochschulen* allemandes³².

Des laboratoires permettant un enseignement aussi complet que nous venons de l'expliquer, poursuit Camichel, nécessiteront un personnel nombreux et expérimenté. Ils entraîneront de très grosses dépenses que M. Pottevin prévoit.

Camichel se déclare ensuite favorable à l'organisation « d'enseignements courts, intensifs et spécialisés, destinés aux ingénieurs déjà en exercice, qui veulent étudier une question particulière. » Il discute en détail, à titre d'exemple, le problème de l'installation d'un moteur Diesel.

Vient ensuite la question des recherches et de leur lien avec l'industrie régionale :

Les Instituts techniques doivent entreprendre des recherches se rapportant aux industries des régions dans lesquelles ils se trouvent, comme le veut le principe des Universités régionales. Comme les usines ne sont pas, sauf dans des cas tout à fait exceptionnels, organisées en vue des recherches, et que les phénomènes utilisés ne présentent pas, en général, la séparation des variables essentielle pour l'expérimentation, les études industrielles devront d'abord être poursuivies dans les Laboratoires.

Camichel prend pour exemple le problème des surpressions hydrauliques dans les conduites, où les résultats obtenus sur un modèle réduit en laboratoire peuvent ensuite être extrapolés à des conduites de 1,2 mètre de diamètre alimentant des turbines de 3 mégawatts.

Dans la dernière partie de sa tribune, Camichel discute la troisième mission des instituts, celle des essais effectués pour le compte d'industriels, et qui sont de deux sortes : les essais de contrôle d'appareils divers (appareils de mesure, moteurs électriques, essais de matériaux, etc.) et les essais de réception « devant se faire à l'usine ». L'importance de ces essais est liée aux services qu'ils rendent à l'industrie régionale, à l'élargissement du champ d'investigation des instituts, et à la relation constante qu'ils instaurent entre instituts et usines.

³² König (2006).

La proposition de loi, conclut Camichel, perfectionne donc ce qui a été créé depuis vingt ans par les universités, et « elle est conforme à la tradition des Universités françaises : elle ne sépare pas les Facultés des Sciences et les Instituts, tout en laissant à ceux-ci l'autonomie nécessaire ». Camichel exprime là une conviction profonde qui l'anime depuis son passage à Lille : les instituts associant enseignement et recherche correspondent à la meilleure articulation entre l'université et l'industrie.

Le décret sur les instituts d'universités (1920). Le projet de loi Pottevin n'aboutit pas mais on en retrouve les idées dans un décret de 1920 relatif à l'organisation générale de l'enseignement supérieur³³. Ce décret, note le ministre dans son introduction, ouvre les conseils d'université à des personnalités non universitaires afin qu'y soient représentés « les grands intérêts de la région » : « Il faut que pénètre dans l'université le grand souffle de la vie générale. » Quant aux instituts, objet des articles 3, 4 et 5 du décret, ils pourront être désormais de deux types : soit de faculté (comme auparavant) soit d'université (dotés d'une plus grande autonomie) :

Dans les universités, poursuit le ministre, l'avenir est aux instituts qui groupent et coordonnent dans un foyer commun les enseignements et les recherches. Il a paru nécessaire de marquer aux universités toute la latitude qu'elles ont – et dont elles n'ont pas assez usé jusqu'ici – de créer des instituts soit d'université, soit de Faculté. [...] Les rapports scientifiques nécessaires sont maintenus entre les instituts et les Facultés compétentes afin de bien marquer que, dans les universités, un lien précis doit unir la science et ses applications. Mais les instituts d'université pourront avoir plus de liberté pour leur administration intérieure.

2.3.4. Le doctorat d'ingénieur-docteur (1923)

Outre la question de la formation d'ingénieurs et de cadres techniques, se pose celle « de favoriser les recherches concernant les applications de la science ».

³³ Décret du 31 juill. 1920 réformant les universités (Arch. ENSEEIHT).

Il s'agit en particulier d'adapter le doctorat ès sciences afin de le rendre attractif pour les ingénieurs, et diffuser ainsi dans l'industrie l'esprit et les méthodes de la recherche scientifique. L'inspiration vient ici de l'Allemagne où les sciences appliquées sont bien développées : onze écoles techniques supérieures y ont délivré, entre 1902 et 1911, 12 360 diplômes d'ingénieur (dont 1491 d'ingénieur électricien), et 1288 diplômes de docteur-ingénieur (dont 130 en électricité). L'idée de créer en France un doctorat de même type est plutôt bien accueillie dans les universités régionales. Elle soulève plus de réserves à la Sorbonne, traditionnellement attachée à la recherche « pure et désintéressée » et peu désireuse de renforcer les liens avec le monde économique ; il y faudra tout le zèle et l'ardeur de Gabriel Koenigs, professeur de mécanique physique, pour vaincre les résistances³⁴. Les écoles quant à elles se montrent peu concernées par la question du doctorat.

Un titre d'ingénieur-docteur est ainsi créé en 1923³⁵. Dans son rapport introductif au Président de la République, le ministre de l'Instruction publique pose clairement les termes du débat :

Depuis longtemps, dans les milieux scientifiques et techniques, s'est manifestée l'opinion qu'il serait avantageux pour le développement des applications de la science à l'industrie sous toutes ses formes, que l'élite de nos jeunes ingénieurs sortant des écoles et Instituts techniques supérieurs soit mise à même de bénéficier des ressources offertes par les laboratoires des universités, pour achever sa formation scientifique et acquérir le goût et les méthodes de la recherche personnelle.

³⁴ Compte rendu du conseil de la faculté des sciences de Paris, 23 nov. 1922 (Arch. nat. AJ16 5123) ; lecture du rapport de Koenigs au conseil de la faculté des sciences de Toulouse, 15 nov. 1922. Gabriel Koenigs (1858-1931), normalien, agrégé et docteur ès sciences mathématiques de l'université de Paris (1882), professeur de mécanique physique et expérimentale à la faculté des sciences de Paris (1897-1931), membre de l'Académie des sciences (1918), professeur au CNAM (1923-1931) (Gispert, 1994).

³⁵ Décret du 30 avr. 1923 de création d'un titre d'ingénieur-docteur (Arch. ENSEIHT).

Cette préoccupation est apparue plus pressante depuis quelques années, afin de prolonger dans la paix l'activité industrielle développée par la guerre et de mieux préparer notre pays aux redoutables concurrences économiques de l'avenir. [...]

Ce n'est pas l'assiduité problématique prévue pour la préparation d'un certificat qui suffit véritablement à donner à un jeune ingénieur, l'empreinte scientifique définitive et durable de notre plus haut enseignement. Le véritable bénéfice du séjour dans les universités, c'est l'éveil et le développement de l'esprit critique qui s'opèrent au laboratoire de recherches par le travail personnel et l'élaboration d'une thèse et non au laboratoire d'enseignement par les exercices scolaires. Le principe doit donc être un séjour de quatre semestres d'études dans un laboratoire vraiment organisé à cet effet, et, à la fin de ce séjour, la soutenance d'une thèse donnant le résultat de recherches personnelles. [...]

Une sanction [de ces études] est nécessaire sous la forme d'un titre qui réponde à leur haute portée. Il a paru que le titre de docteur était le seul qui convînt et que pour éviter toute confusion avec le grade de docteur ès sciences la meilleure solution était d'unir dans une expression double les deux titres obtenus consécutivement, soit ingénieur-docteur.

Enfin, il a été prévu que certains ingénieurs admis ainsi dans les laboratoires pourraient désirer se consacrer plus complètement encore à ce genre d'études et, par le doctorat ès sciences, accéder aux postes d'enseignement de l'enseignement supérieur universitaire ou technique et à la direction des laboratoires. Les ingénieurs-docteurs qui ne seraient pas d'ailleurs dispensés de la licence ès sciences, seraient autorisés, pour le doctorat ès sciences proprement dit, à présenter la même thèse que pour l'obtention du titre d'ingénieur-docteur. Il eût été excessif d'exiger une seconde thèse. Cette disposition marque, d'ailleurs, toute la valeur scientifique que doivent présenter les thèses d'ingénieur-docteur³⁶.

³⁶ Rapport du ministre de l'Instruction publique au président de la République, décret du 30 avr. 1923 (Arch. ENSEEIHT).

Dans son article 3, le décret indique ainsi que le titre d'ingénieur-docteur ne peut être obtenu qu'après quatre inscriptions semestrielles dans un laboratoire d'une faculté des sciences et la soutenance d'une thèse originale devant un jury composé de trois membres de la faculté. L'article 4 précise que les thèses admises avec la plus haute mention pourront être présentées à nouveau pour l'obtention du grade de docteur ès sciences – lequel ouvre aux carrières universitaires. Le décret consacrera ainsi « le rapprochement fécond de la science et de l'industrie, des méthodes savantes et des méthodes techniques ».

2.3.5. Débats sur le titre d'ingénieur

De l'ingénieur de l'État à l'ingénieur industriel. Jusqu'au milieu du XIX^e siècle, le terme d'ingénieur désignait les membres des corps de l'État – génie militaire, génie maritime, ponts et chaussées, mines, etc. – issus pour la plupart de l'École polytechnique et de ses écoles d'application³⁷. Une nouvelle acception du terme apparaît sous le Second Empire, qualifiant ainsi les cadres techniques de l'industrie formés notamment par l'École centrale des arts et manufactures – fondée en 1829. Des écoles diverses vont alors s'emparer du terme et délivrer des brevets et diplômes d'« ingénieur industriel ».

Vers un contrôle du titre. Le titre d'ingénieur n'étant protégé par aucune réglementation, toute formation peut se l'approprier. C'est pourquoi lorsqu'un patron doit recruter un cadre pour son entreprise, il préfère souvent s'en remettre au diplôme de telle ou telle école particulière, qui a ses faveurs, sans considération pour une éventuelle mention « ingénieur ». Certains conseils d'école sont même hostiles à l'inscription de cette mention sur les diplômes – le conseil de perfectionnement de l'École supérieure d'électricité ne l'acceptera qu'en 1904, à la demande insistante du directeur et des élèves³⁸. La multiplication, au tournant du XX^e siècle, du nombre d'établissements délivrant des diplômes d'ingénieur (ainsi les Arts et Métiers à partir de 1907) engendre une situation de concurrence dont les « grandes écoles » s'inquiètent.

³⁷ Shinn (1980).

³⁸ Grelon (1991*b*, p. 839-840).

Celles-ci n'hésitent pas à même dénoncer le caractère « criminel » de nouvelles venues mettant leurs jeunes diplômés « sur le pavé » – diplômés que le marché du travail absorbe pourtant sans difficulté. Un mouvement se dessine alors vers une réglementation de la délivrance du titre.

Un autre problème structurel apparaît : celui du niveau d'études auquel correspond un diplôme d'ingénieur. Quel type de formation un tel diplôme doit-il sanctionner ? Tout domaine technique peut-il y prétendre ou faut-il limiter le périmètre disciplinaire ? La discussion s'amplifie dans l'entre-deux-guerres, alimentée notamment par le chimiste Henry Le Chatelier, théoricien de la « science industrielle » et auteur d'un livre remarqué³⁹. Le débat aboutit à la mise en place, en 1934, d'une commission des titres⁴⁰. Cette commission, au sein de laquelle se reportent les concurrences et jeux de pouvoir, restera cependant controversée au sein de la profession.

³⁹ Henry Le Chatelier (1850-1936), polytechnicien et ingénieur des mines, membre actif de la Société d'encouragement pour l'industrie nationale, professeur au Collège de France et membre de l'Académie des sciences, auteur notamment de l'ouvrage *Science et Industrie* (1925) où il se fait le chantre d'un rationalisme scientifique et autoritaire (J. Toutain, Henry Le Chatelier (1850-1936). *Revue internationale de l'enseignement* n° 90, 1936, p. 244-246. M. Lette, Henry Le Chatelier, taylorien français. *Alternatives Économiques* n° 231, déc. 2004).

⁴⁰ Loi du 10 juillet 1934 sur les conditions de délivrance du titre d'ingénieur diplômé (institution d'une commission des titres d'ingénieurs) (Arch. ENSEEIHT).

Chapitre 3

Les instituts électrotechniques

À ces mots de hangar, de couloir, de salon, et avant même qu'ils eussent fini d'être prononcés, mon cœur fut bouleversé avec plus de rapidité que n'eût mis un courant électrique, car la force qui fait le plus de fois le tour de la terre en une seconde, ce n'est pas l'électricité, c'est la douleur.

Marcel Proust, *Albertine disparue*, 1922

En préambule aux chapitres suivants consacrés à l'institut de Toulouse, ce chapitre présente l'histoire des instituts électrotechniques de Nancy, Grenoble et Lille. Ces trois histoires, bien étudiées par les historiens et sociologues¹, font apparaître des points communs remarquables mais aussi des spécificités. Un premier point commun est l'intérêt que portent les facultés des sciences, au tournant du xx^e siècle, au développement industriel et économique de leur région, et la façon dont ces facultés se saisissent des nouvelles libertés que leur accorde la réforme des universités de 1896 ; le succès considérable des instituts auprès des étudiants en est un juste retour. Un second point est la mobilisation des collectivités locales (municipalités et conseils départementaux) pour le développement de formations d'ingénieurs, au-delà donc de leur engagement plus traditionnel en faveur de la formation des apprentis et ouvriers. Un troisième point est la tiédeur du soutien des industriels qui, à l'exception notable de quelques mécènes, ne s'engagent que tardivement. Un dernier point commun est la lenteur de l'essor de la recherche scientifique. Quant aux traits spécifiques à chacun des instituts, ils sont liés à l'histoire économique et universitaire de leur région et aux personnalités en présence.

¹ Fox & Weisz (1980) ; Paul (1985, chap. 4) ; Grossetti (1996) ; Badel (1997).

3.1. L'institut de Nancy

Le développement lorrain des sciences appliquées.

L'intérêt lorrain pour les sciences appliquées est contemporain de la création, en 1854, de la faculté des sciences de Nancy². Deux ans après cette création, les applications de l'électricité s'introduisent dans le cours de licence du professeur de physique, qui discute notamment la télégraphie et la galvanoplastie.

Le premier institut nancéien est l'œuvre, près de trois décennies plus tard, d'un jeune maître de conférences, Albin Haller. Alsacien d'origine sociale modeste, Haller a opté pour la France suite à la défaite contre la Prusse, et a poursuivi des études de pharmacie à Nancy puis de chimie à Paris³. Le projet d'institut de chimie qu'il propose à la faculté, vers 1883, est inspiré du modèle allemand où recherche et applications industrielles sont étroitement associées. Ce projet est accueilli très favorablement, en particulier par Ernest Bichat, professeur de physique et futur doyen ; il est également bien perçu par le ministère de l'Instruction publique pour son intérêt « patriotique et national », et par le conseil départemental et la municipalité. Les milieux industriels restent en revanche en retrait, peu conscients encore de l'intérêt des nouvelles compétences que sont susceptibles de leur apporter les diplômés de la faculté⁴. L'institut accueille ses premiers étudiants en 1889. Il délivre, après

² Birck (2006a) ; Birck (1996) ; Birck & Rollet (2015).

³ Albin Haller (1849-1925), né dans le Haut-Rhin, est d'abord apprenti menuisier puis travaille chez un pharmacien. Bachelier en 1870 à Strasbourg, il poursuit ses études à l'École supérieure de pharmacie de Nancy, puis soutient une thèse de doctorat ès sciences à Paris sur la chimie du camphre. Nommé maître de conférences (1879) puis professeur (1884) à la faculté des sciences de Nancy, il y crée et dirige un institut de chimie. Il obtient en 1899 la chaire de chimie organique à la Sorbonne, puis dirige de 1905 à 1924 l'École municipale de physique et de chimie industrielles de Paris. Élu à l'Académie des sciences en 1900, il est également membre de l'Académie de médecine et de l'Académie d'agriculture de France, et lauréat, en 1917, de la médaille Davy de la Royal Society (Charle & Telkès, 1989, p. 148-150).

⁴ Birck (2006b).

une scolarité de trois ans, un diplôme de chimiste (le terme d'ingénieur n'est pas employé). En 1897, Haller sollicite l'industrie régionale pour la création d'un laboratoire d'électrochimie et de chimie physique. L'appel est cette fois mieux entendu, notamment par l'industriel et mécène belge Ernest Solvay – exploitant des mines de sel lorrain – qui offre une importante subvention de 100 000 francs.

L'électricité industrielle est quant à elle introduite en 1894 par Bichat, dans un enseignement élémentaire s'inscrivant dans la tradition des cours publics du soir à destination d'un large auditoire. Trois ans plus tard, un laboratoire d'essais de dynamos et d'étalonnage d'instruments de mesures électriques – appareils dont l'utilisation se répand rapidement dans les usines et manufactures – est adjoint au nouveau laboratoire d'électrochimie de Haller. Le conseil départemental de Meurthe-et-Moselle soutient l'initiative avec une subvention de 100 000 francs.

Naissance et essor de l'institut électrotechnique. Le projet d'un institut électrotechnique apparaît l'année suivante, en 1898, dans le rapport annuel du doyen de la faculté des sciences. Bichat cherche alors à hisser la physique à la hauteur où Haller a su porter la chimie. Le projet s'inspire de l'organisation de l'Institut Montefiore de Liège qui fait alors figure de modèle, et que Bichat a visité. Les industriels, qui avaient tardé à apporter leur appui à l'institut de chimie, se mobilisent cette fois plus franchement en faveur de « l'alliance de la science et de l'industrie », sous l'égide de la Société industrielle de l'Est.

Grâce à l'appui déterminant, une fois de plus, de Solvay, l'institut ouvre ses portes aux premiers étudiants en 1900. Il s'adresse à des étudiants déjà diplômés, en possession des certificats de licence de mathématiques et de physique générale, ou de titres équivalents, et leur offre une spécialisation en une année sanctionnée par un diplôme d'études électrotechniques – selon un schéma semblable à celui de l'École supérieure d'électricité (ESE). Dès la rentrée suivante, apparaît sur le diplôme la mention « ingénieur » affirmant clairement la vocation professionnelle de la formation. Il s'agit du premier diplôme d'ingénieur délivré par la faculté des sciences de Nancy. L'enseignement général est dispensé

par des universitaires : François Perreau (maître de conférences de physique) pour l'électrotechnique générale et Henri Vogt (professeur de mathématiques) pour la mécanique appliquée, accompagnés par deux chefs de travaux. Pour les enseignements pratiques, il est fait appel à un polytechnicien diplômé de l'ESE, Alexandre Mauduit, qui a travaillé dans l'industrie. La formation est complétée par des cours de dessin industriel, de comptabilité et de construction.

Une orientation vers la mécanique appliquée apparaît avec la création d'un laboratoire, puis, en 1905, d'une nouvelle section délivrant un diplôme d'ingénieur mécanicien. Pour diriger le laboratoire, il est fait appel à Ernest Hahn, diplômé du *Polytechnikum* de Zurich et professeur à l'École polytechnique de Lausanne⁵. L'institut change alors de nature : il accueille désormais des élèves au niveau du baccalauréat, pour une scolarité de trois ans organisée en deux sections d'électricité et de mécanique. La condition d'entrée auparavant en vigueur – la possession de deux certificats –, très contraignante compte tenu de l'étroitesse du vivier d'étudiants nancéiens, est ainsi levée (en 1900-1901, la faculté délivre 13 certificats de calcul différentiel et intégral, 5 de physique générale, et 37 de chimie). Le baccalauréat n'est pas même exigé : l'institut est ouvert aux élèves de l'école primaire supérieure et des écoles professionnelles, ainsi qu'aux étudiants étrangers. Cette dernière ouverture en particulier – l'entrée en France des étudiants étrangers est entièrement libre – va s'avérer très profitable à l'institut. Associée à une véritable politique d'accueil encouragée par le doyen Bichat (comités de patronage, cours de langue française et de culture générale), elle draine vers Nancy des flux d'étudiants en provenance d'Europe orientale et de Russie – flux qui se détournent alors d'une Allemagne qui se ferme à l'immigration. En cinq ans, les effectifs de l'institut électrotechnique passent ainsi de 6 à 206, dont plus de la moitié d'étrangers. Les universités de Grenoble et de Toulouse connaissent pour les mêmes raisons un semblable afflux d'étudiants étrangers.

⁵ Hager & Hahn (2006).

Ernest Bichat (1845-1905)

Né le 17 septembre 1845 à Lunéville dans une famille de maraîchers, Ernest Bichat entre à l'École normale supérieure en 1866 et obtient l'agrégation de sciences physiques en 1869^a. Après deux ans d'enseignement au lycée de Poitiers, il revient à l'ENS comme agrégé préparateur et soutient en 1873 une thèse sur la polarisation de la lumière. Il retourne deux ans en lycée, à Versailles, puis obtient un poste de chargé de cours à la faculté des sciences de Nancy (1876), où il est nommé professeur de physique l'année suivante. Ses travaux portent alors sur l'induction et les transformateurs électriques. Il est élu correspondant de l'Académie des sciences en 1893. Doyen de la faculté des sciences de 1888 à 1905, il encourage le développement des sciences appliquées en recherchant le concours des collectivités locales et de l'industrie régionale. Il soutient notamment l'institut de chimie créé par Albin Haller puis crée un laboratoire et une école de brasserie. Il fonde en 1900 l'institut électrotechnique de Nancy avec le soutien généreux de l'industriel belge Ernest Solvay et le concours de la Ville qui offre le terrain. Républicain convaincu, Bichat est impliqué dans la vie publique comme membre du conseil municipal puis membre du conseil départemental de la Meurthe-et-Moselle (1880), conseil qu'il préside de 1892 à 1895. Il meurt en 1905 en pleine activité, travaillant sur un projet d'institut de physique qui sera inauguré quatre ans plus tard.



^a. Birck & Grelon (2006).

En 1913, l'institut électrotechnique compte 464 élèves régulièrement inscrits (dont 63 au cours préparatoire), rassemblant ainsi près de la moitié des effectifs de la faculté des sciences (l'institut de chimie compte alors 123 élèves). Il délivre cette année-là 39 diplômes d'ingénieurs électriciens et 18 diplômes d'ingénieurs mécaniciens. L'envolée des effectifs procure de substantielles recettes liées aux différents droits d'inscription, sur lesquelles sont rétribués les enseignants contractuels et le personnel technique. Revers de ce succès, le niveau des étudiants est très hétérogène, problème que résout, au moins en partie, l'organisation d'une année préparatoire. Quant au nombre important de diplômés mis sur le marché du travail, la prospérité économique de la période permet de l'absorber sans difficulté. Le patronat lorrain se montrant peu

soucieux d'élever la qualification de ses personnels, les diplômés vont plutôt irriguer le grand quart nord-est de la France, et l'étranger.

L'entre-deux-guerres. Le retour en 1918 de l'université de Strasbourg dans le giron national, associé à la volonté politique de faire de cette université une vitrine de la science française – en y attirant les meilleurs enseignants par des conditions avantageuses –, pouvait entraver le développement nancéien. L'institut électrotechnique est en réalité peu affecté par cette nouvelle concurrence. Dirigé par Henri Vogt depuis le décès de Bichat en 1905, l'institut bénéficie de la combativité du nouveau doyen de la faculté des sciences et de subventions pour de nouveaux bâtiments. Alexandre Mauduit, titulaire d'une chaire d'électrotechnique créée en 1913 (et largement financée par Solvay), bien introduit dans les milieux ministériels et industriels, fait de son laboratoire d'essais électriques l'un des mieux équipés de France. Ernest Hahn, qui dirige le laboratoire de mécanique, obtient des crédits importants du ministère des Travaux publics et de la Société hydrotechnique de France (210 000 francs en 1919 et un million en 1920) pour des études de pompes et turbines hydrauliques.

Le contexte économique défavorable des années 1920 et la concurrence locale de la nouvelle École de la métallurgie et des mines, engendrent toutefois une baisse des effectifs étudiants. Afin de rendre l'institut électrotechnique plus attractif, un concours d'entrée est instauré sur la base du programme de la classe préparatoire de mathématiques spéciales (un an après le baccalauréat). Ce concours vise également un meilleur « filtrage » des « bons » étudiants étrangers, dans un contexte national de raidissement vis-à-vis de l'immigration. La baisse des effectifs se poursuit néanmoins dans les années 1930 – du fait notamment de la démographie – et l'institut ne doit alors sa survie qu'au soutien de l'industrie locale⁶. En 1944, Mauduit cède la direction de l'institut à Jean Capelle, titulaire depuis l'année précédente de la

⁶ (Birck, 2006b).

chaire de mathématiques appliquées⁷. L'institut, alors transformé en École supérieure d'électrotechnique et de mécanique, accède en 1948 au nouveau titre d'École nationale supérieure d'ingénieurs (ENSEM).

3.2. L'institut de Grenoble

Du fait de sa situation géographique au cœur des Alpes, la région grenobloise voit dès les années 1860 un développement important de l'utilisation industrielle de l'énergie hydraulique⁸, laquelle va stimuler l'ouverture de formations d'ingénieurs.

3.2.1. De l'institut électrotechnique à l'institut polytechnique

De l'énergie hydraulique à l'électricité industrielle. Les débuts de l'hydraulique grenobloise sont marqués par la célèbre personnalité d'Aristide Bergès, qui crée de florissantes usines de pâte à papier et popularise l'expression de « houille blanche ». À l'utilisation directe de l'énergie hydraulique, se substitue bientôt, avec le progrès des génératrices et moteurs électriques, sa conversion préalable en électricité (cf. chap. 1). Cette hydroélectricité profite en premier lieu à l'électrochimie et à l'électrometallurgie. De nombreux produits chimiques sont ainsi synthétisés tels les chlorates pour les engrais et explosifs ; un procédé d'élaboration de l'aluminium est breveté en 1886 par le physicien Paul Héroult ; les fours à

⁷ Jean Capelle (1909-1983), normalien et titulaire d'un doctorat sur la théorie des engrenages (1938), a notamment participé à la conception de la boîte de vitesse de la 2CV Citroën. Après la Seconde Guerre mondiale, il occupera plusieurs fonctions importantes dans la haute administration de l'Éducation nationale et sera député de la Dordogne (1968-1973) (Birck, 2006a, p. 66-67).

⁸ Nye (1986, chap. 3) ; Santon (1951, p. 7-23) ; Moret (1997) ; Viollet (2005, p. 152-165).

arc électrique permettent d'obtenir des aciers et alliages ferreux de composition bien contrôlée. Au-delà de ses utilisations locales, l'électricité est transportée de plus en plus loin – Marcel Deprez fait fonctionner en 1883 une ligne électrique entre Vizille et Grenoble.

À cet essor industriel, correspond l'émergence de l'enseignement des applications de l'électricité⁹. Cet enseignement est initié par un jeune normalien et agrégé de sciences physiques, Paul Janet, nommé en 1886 chargé de cours à la faculté des sciences. À l'issue d'une thèse sur le magnétisme soutenue à Paris en 1890, il engage des recherches sur les oscillations électriques, dans l'esprit d'une science « pure et désintéressée ». Au contact du milieu grenoblois, son intérêt s'éveille aux applications. Il s'engage ainsi dans un cours du soir de physique industrielle, organisé conjointement par la ville et par la faculté, et consacre ce cours principalement à l'électricité.

Pour sa première leçon en février 1892, Janet a su faire de la publicité : l'amphithéâtre est plein, les industriels sont là. Le cours remporte un franc succès, la presse rend compte de l'événement avec enthousiasme. Le ministre lui-même, averti, transmet à Janet ses félicitations par l'intermédiaire du recteur. La chambre de commerce demande alors la création d'un véritable cours d'électricité industrielle et recueille des subventions ; Aristide Bergès soutient ardemment l'initiative ; le conseil municipal lance l'idée d'un institut électrotechnique. Le doyen de la faculté François Raoult, qui poussait plutôt la création d'une chaire de chimie industrielle, s'incline et ouvre le cours demandé. Janet inaugure donc, en 1892-1893, un cours en seize leçons faisant de Grenoble la première ville à offrir un enseignement supérieur complet d'électrotechnique (Figure 3.1). Le programme porte sur le magnétisme, les dynamos, la transmission électrique et le transport de force. L'année suivante, Janet traite surtout de l'éclairage, de la distribution électrique, et aborde l'électrochimie et l'électrometallurgie. Il installe dans le même temps un laboratoire, équipé par des dons d'industriels.

⁹ Nye (1986, p. 86-90) ; Grelon (1991b, p. 818-824).

RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

ACADÉMIE DE GRENOBLE **FACULTÉ** ANNÉE SCOLAIRE 1892-1893

Des Sciences
DE GRENOBLE

COURS
D'ÉLECTRICITÉ INDUSTRIELLE

M. JANET, DOCTEUR ÈS SCIENCES
CHARGÉ DU COURS

COURS PUBLIC. — Le **JEUDI** à 3 h. 1/2. — Etude approfondie des machines dynamo-électriques; caractéristiques; propriétés magnétiques et électriques des matériaux; projet d'une dynamo à courant continu de puissance donnée.

Transport de l'Energie mécanique; traction électrique; tramways et locomotives. Eclairage; lampes à incandescence; lampes à arc. Canalisation et distribution de l'énergie électrique; stations centrales; systèmes divers.

CONFÉRENCE PRATIQUE. — Le **VENDREDI** à 10 h. et demie. Mesures électriques industrielles.

*Le Cours public s'ouvrira le **JEUDI 12 JANVIER 1893***
Grenoble, le 27 décembre 1892.

Le Doyen de la faculté des Sciences,
RAOULT.

Yu et approuvé :
Le Recteur de l'Académie,
G. BIZOS

Figure 3.1 Affiche du cours de Paul Janet pour l'année 1892-1893.

L'institut électrotechnique, ses premières années. À l'automne 1894, Janet, nommé chargé de cours à la Sorbonne, quitte Grenoble. Le physicien Joseph Pionchon (1859-1938) prend le relais et engage la mise sur pied de l'institut qu'appellent de leurs vœux la chambre de commerce, les industriels et la ville. Mais c'est de la faculté de droit – la plus riche – que vient l'appui décisif. La motion

qu'elle soumet au tout nouveau conseil de l'université, en 1898, est incisive :

La faculté de droit, de qui viennent presque toutes les recettes, ne demande rien ; elle est d'avis que la presque totalité soit consacrée à la fondation d'un institut électrotechnique¹⁰.

Faute de quoi, poursuit la motion, chaque faculté devra se satisfaire de ses propres recettes. La faculté des lettres appuie l'idée. La faculté des sciences, qui ne peut refuser un tel cadeau, se soumet donc. La presse applaudit, et la revue *La Lumière électrique* se fait l'écho de l'événement :

L'université de Grenoble a pensé qu'il était de son devoir de seconder plus énergiquement le mouvement industriel dont elle avait été l'un des promoteurs, et elle a décidé d'organiser à la faculté des sciences, à partir de l'année 1898-1899, un enseignement complet, théorique et pratique, de l'électricité industrielle, offrant l'équivalent d'une véritable école d'électrotechnique¹¹.

L'institut s'installe dans ses murs en 1900 et il est inauguré par Louis Liard le 11 mars 1901. Pionchon en est le premier directeur. Une maîtrise de conférences en électricité industrielle est alors créée et attribuée à Louis Barbillion, ingénieur Supélec, qui devient sous-directeur de l'institut (cf. encadré biographique).

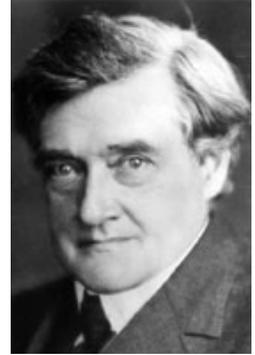
L'institut, ouvert aux bacheliers et aux brevetés du primaire supérieur, délivre en deux ans un brevet d'électricien. La formation comprend un cours d'électricité, des travaux pratiques de laboratoire et d'atelier, des exercices d'établissement de plans et de devis, des visites d'usines, des exercices de conduite de machines, et des stages. En 1903, le brevet de fin d'études est transformé en diplôme d'ingénieur électricien, tandis que l'enseignement est complété par des cours de mécanique, de chimie et de dessin. Une formation complémentaire d'une année pour ingénieurs déjà diplômés est ouverte, sur le modèle de Supélec. La même année s'ouvre aussi une formation pratique de conducteur électricien. L'institut est désormais bien soutenu par le nouveau doyen de la faculté et par des subventions du ministère.

¹⁰ Grelon (1991b, p. 821).

¹¹ Grelon (1991b, p. 821).

Louis Barbillion (1873-1945)

Né à Compiègne en 1873, Louis Barbillion est licencié ès sciences physiques de la Sorbonne et ingénieur de l'ESE ^a. Après quelques mois à la Compagnie des omnibus, il entreprend une thèse de doctorat avec Gabriel Lippmann sur les diélectriques, puis rejoint l'institut électrotechnique de Grenoble. Maître de conférences en 1901, il est nommé professeur en 1905 et prend la direction de l'institut. Le mécénat du président de la chambre de commerce lui permet de lancer plusieurs projets d'agrandissements, rendus nécessaires par la forte croissance du nombre d'étudiants – une dizaine en 1905, plus de 500 à la fin des années 1920. Barbillion adjoint à l'institut une école de papèterie, financée et gérée par le Syndicat des papetiers, ainsi qu'une usine reconvertie en laboratoire, rue Diderot, pour des essais électriques, hydrauliques et mécaniques. Il quitte l'institut en 1928, laissant plusieurs chantiers inachevés que son successeur René Gosse mènera à leur terme.



Ses tâches administratives ne l'empêchent pas de poursuivre une importante activité scientifique : il est auteur de plusieurs livres et de 200 mémoires scientifiques et techniques relatifs à la traction électrique, aux alternateurs, à la régulation des turbines, aux ondes sur les lignes électriques, et aux appareils de mesure. Directeur d'une collection de la Bibliothèque de l'ingénieur (45 volumes), il est reconnu pour sa large culture générale, tant scientifique que littéraire. Lauréat de l'Institut et président de plusieurs sociétés savantes et professionnelles. Croix de guerre et officier de la Légion d'honneur.

^a. Fortrat (1945a) ; Hager (2009, p. 900).

En 1905, Pionchon quitte Grenoble pour une chaire de physique à Dijon. Barbillion, nommé professeur, prend alors la direction de l'institut – une partie de son traitement reste payé par la municipalité. Le nombre d'étudiants croît rapidement malgré un durcissement progressif des conditions d'accès : 11 élèves en 1900, 233 en 1910, 450 en 1914. Les enseignements se diversifient. Un cours d'hydraulique est d'abord ouvert par Georges Routin, polytechnicien et ingénieur en chef des ateliers Neyret-Brenier. Une maîtrise de conférences d'électrochimie et électrometallurgie est créée en 1907, attribuée à Georges Flusin. La même année, l'Union des fabricants

de papier obtient l'ouverture d'une École française de papèterie (EFP), annexée à l'institut électrotechnique.

L'initiative des papetiers est le premier véritable soutien d'une industrie régionale restée jusque-là en retrait. Celle-ci avait bien encouragé au départ la création d'enseignements d'électricité industrielle, mais, considérant qu'elle avait déjà beaucoup investi dans l'École supérieure d'électricité de Paris, son soutien était resté essentiellement verbal. Ainsi Barbillion s'écrie-t-il en 1906 :

Les tracas sans fin, les soucis stériles et le travail matériel écrasant qui ont été le lot des directeurs de l'institut [...] seraient de beaucoup diminués si notre œuvre avait rencontré plus d'écho dans le monde industriel à qui, en somme, elle était destinée¹².

Le président de la chambre de commerce Casimir Brenier, puissante personnalité, retourne la situation en offrant à l'institut un véritable mécénat. Il lui cède ainsi en 1907 un terrain de 7 000 m² au centre de la ville. De son côté, la Ville cède en 1908 une usine électrique désaffectée, rue Diderot. Cette usine, qui comprend des installations hydrauliques, électrométallurgiques, et des fours électriques, est transformée en laboratoire d'essais à échelle industrielle. La Ville offre de plus, en 1912, une parcelle de terrain de 1 200 m² contiguë à la donation de Brenier, et prend en charge la moitié des frais de construction et d'aménagement d'un nouveau bâtiment. L'industrie régionale, convaincue, embauche désormais les nouveaux ingénieurs.

Transformation en institut polytechnique. En 1912, l'établissement prend la dénomination d'institut polytechnique de Grenoble (IPG) en référence aux *Technische Hochschulen* allemandes et au *Polytechnikum* de Zurich. Le nombre d'élèves se maintient pendant la guerre et croît encore dans les années 1920 – il représente alors plus du tiers des effectifs de la faculté des sciences. Barbillion entreprend plusieurs travaux d'agrandissements et d'aménagement de laboratoires et installations d'essais industriels¹³. L'essor de l'électrochimie

¹² L. Barbillion (1906) cité par Robert (2001, p. 177).

¹³ Robert (2001, chap. I.2) ; Grelon (1995, p. 185-187).

et de l'électrométallurgie, sous la direction de Flusin, conduit en 1921 à la transformation de la section en institut autonome. La section d'hydraulique est elle-même transformée en école d'ingénieurs hydrauliciens en 1928. Barbillion quitte l'institut cette année-là. Le mathématicien René Gosse prend sa succession, en plus de sa charge de doyen de la faculté. Excellent administrateur, Gosse conduit à leur terme les chantiers engagés et met la communauté scientifique grenobloise sur la voie de son expansion de l'après-guerre¹⁴.

3.2.2. Le lent démarrage de la recherche

L'électricité industrielle. Le laboratoire d'électricité industrielle associé à l'institut se donne pour vocation initiale, en 1901, les essais d'appareils (contrôle, étalonnage, etc.). La Ville, principal client pour son propre réseau de distribution électrique, y affecte un personnel technique, précieuse aide en nature. Le ministère de l'Instruction publique abonde de son côté avec la création d'un poste de chef des travaux, accompagné de quelques crédits. L'activité de contrôle et d'essais, censée favoriser les relations avec l'industrie et permettre quelques rentrées financières, reste cependant limitée. La clientèle industrielle ne se manifeste vraiment qu'à partir de 1908, année où Barbillion obtient du ministère des Travaux publics que le laboratoire soit agréé pour la certification des compteurs électriques – jusqu'alors prérogative du seul Laboratoire central parisien.

Les analyses physico-chimiques. Deux autres laboratoires se constituent dans les années suivantes : un laboratoire d'analyses chimiques pour la papèterie et

¹⁴ René Gosse (1883-1943), normalien et professeur de lycée à Bordeaux, soutient un doctorat de mathématiques en 1921. Il est nommé alors maître de conférences à Grenoble, puis professeur en 1923. Il est élu doyen de la faculté des sciences en 1927, et directeur de l'institut polytechnique en 1928. Militant SFIO, élu municipal socialiste, cofondateur du Comité de vigilance des intellectuels antifascistes, il est révoqué de ses fonctions de doyen par Vichy en 1940. Engagé dans la Résistance, il est assassiné par la Gestapo, avec son fils Jean, en décembre 1943 (Fortrat, 1945b).

une station électrochimique. Pour le premier, Barbillion obtient en 1909 la création d'un poste de maître de conférences de micrographie appliquée à la papèterie, attribué à Louis Vidal. Celui-ci, auparavant chef de travaux rattaché à la chaire de botanique, développe des collaborations avec le ministère de l'Agriculture et le ministère des Colonies, sans parvenir toutefois, au moins jusqu'à la guerre, à intéresser les papetiers. Il élargira ensuite ses analyses à diverses matières premières telles que les pâtes, les colles et les colorants.

L'électrochimie. Le développement de la station électrochimique est dû à Georges Flusin (1872-1954). Après une thèse sur les phénomènes d'osmose dans les liquides (1907) auprès du célèbre chimiste grenoblois François Raoult¹⁵, Flusin oriente son activité vers l'électrochimie et l'électrometallurgie. Disposant de très modestes moyens, il parvient à monter un laboratoire dans l'usine désaffectée Diderot où il trouve les fours nécessaires. Nommé professeur en 1912 sur la nouvelle chaire d'électrochimie et électrometallurgie, il est sollicité pendant la guerre par un industriel régional pour l'élaboration d'un alliage métallique résistant aux acides. Son succès lui vaut de nouvelles commandes (relatives au magnésium, au chlore, etc.) qui lui permettent d'étendre son laboratoire et d'asseoir sa réputation, et surtout de convaincre les entrepreneurs de l'intérêt d'une recherche industrielle. Flusin raconte ainsi :

J'avais compris que pour donner à mon enseignement l'orientation technique attendue, la connaissance des principes théoriques ne suffirait pas et qu'il me fallait associer à mes projets les industriels de l'électrochimie et de l'électrometallurgie. J'y réussis au prix d'efforts persévérants. Les usines s'ouvrirent peu à peu devant moi¹⁶.

Après la guerre, Flusin poursuit ses analyses métallurgiques, assisté par Lucien Andrieux. Celui-ci soutient sa thèse en 1929 puis prend la succession de Flusin.

¹⁵ Nye (1986, p. 98-116) ; G. Allard, Genèse et développement de la thermodynamique, *in* (Taton, 1981, p. 288-289).

¹⁶ Cité par Robert (2001, p. 43).

Leurs activités à caractère lucratif donnent aux trois laboratoires ci-dessus une certaine aisance matérielle, mais, accaparant toutes les énergies, entravent l'écllosion d'une véritable recherche académique¹⁷. Barbillion le déplore, autant que s'en était plaint son prédécesseur Pionchon. Un pas significatif vers une recherche « propre à faire avancer la science » est réalisé avec la création d'un nouveau laboratoire tourné vers la métallurgie, le laboratoire d'essais mécaniques des métaux, chaux et ciments (LEM).

La métallurgie physique. Créé au début des années 1920, le LEM est le fruit des efforts conjoints de Barbillion et de l'Association des producteurs des Alpes françaises (qui réunit des entrepreneurs de l'hydroélectricité). Il doit faire coexister « recherche désintéressée » et service aux industriels. Le ministère des Travaux publics lui accorde plusieurs subventions que viennent compléter une souscription auprès des entreprises et des aides de la ville et du département. La direction du laboratoire revient à Pierre Dejean (1877-1938), ingénieur de l'institut électrotechnique et chargé de cours de métallurgie. Il faut néanmoins attendre quelques années pour que les industriels se montrent réellement intéressés. La Société des amis du LEM finance alors une chaire de métallurgie physique pour Dejean (1928) ainsi qu'une bourse d'études annuelle. Les travaux de Dejean portent dans les années 1930 sur la fragilité des métaux.

Les succès des laboratoires de Flusin et de Dejean incitent Barbillion à multiplier les projets de laboratoires de recherche associant des industriels, dans les domaines des hautes tensions électriques, de l'hydraulique, et de la physico-chimie de la cellulose. Mais faute de soutiens suffisants, là encore, ce n'est que dans les années 1930, sous la direction de René Gosse, que ces projets pourront aboutir.

L'hydraulique. L'idée d'un laboratoire d'études hydrauliques est présente dès la fondation de l'institut grenoblois. De forts arguments la soutiennent : la houille blanche est exploitée de façon industrielle dans la région

¹⁷ Robert (2001, p. 197-223).

depuis les années 1860 et a donné naissance à des institutions importantes telles que la Société hydrotechnique de France et la Chambre syndicale des forces hydrauliques ; la création d'un tel laboratoire est par ailleurs encouragée par le ministère des Travaux publics. Quelques études sont alors engagées, par Georges Routin sur les turbines, par Pierre Dejean sur l'érouissage des conduites forcées, et par Georges Prudon sur la résistance des ouvrages en béton. Mais les projets successifs d'un véritable laboratoire échouent faute de soutiens suffisants. Ces soutiens s'affaiblissent encore lorsque sont créés à Grenoble, en 1922, deux laboratoires d'essais : le Laboratoire dauphinois d'hydraulique (LDH) de la société Neyret-Beylier et Piccard-Pictet (NBPP) dirigée par Maurice Gariel¹⁸, et celui de la Société hydrotechnique de France (SHF). Les enseignants de l'institut polytechnique sont donc amenés à collaborer avec ces laboratoires. Le LDH acquiert une dimension internationale avec l'arrivée en 1928 de Pierre Danel, soucieux de tisser des liens forts entre les institutions universitaires et les organisations professionnelles nationales et internationales (Société hydrotechnique de France, Association internationale de

¹⁸ Maurice Gariel (1884-1960), licencié ès sciences et ingénieur de l'ESE, entre en 1906 aux Ateliers Neyret-Beylier, constructeur d'équipements hydrauliques. Ses premiers travaux portent sur les coups de bélier dans les conduites, en collaboration avec Charles Camichel et Denis Eydoux, et sur les turbines, avec Auguste Rateau. En 1917, il fonde la société NBPP à partir des Ateliers Neyret-Beylier et de l'entreprise genevoise Piccard-Pictet, spécialiste de turbines. NBPP, que Gariel dirigera pendant 43 ans, s'impose dès l'entre-deux-guerres comme le champion français des turbines, des aménagements hydrauliques, de l'hydraulique agricole et de la protection maritime. Rebaptisée Neyrpic en 1948, l'entreprise devient un leader mondial de l'ingénierie hydraulique (elle sera revendue à Althsom en 1967). Gariel, convaincu de la nécessité d'associer ingénieurs et universitaires, est membre du conseil de l'université de Grenoble et préside le Comité de patronage des étudiants étrangers. Membre actif de la SHF, il en préside la section Machines puis le conseil d'administration. Gariel décède en pleine activité à l'âge de 76 ans, unanimement salué pour ses qualités humaines et son ouverture d'esprit (*La Houille Blanche* n° 1, p. 1-2 (1960) ; Sauvage de Saint-Marc (1961) ; Dalmasso & Robert (2007)).

recherches hydrauliques, et Commission internationale des irrigations et du drainage)¹⁹.

L'émergence d'un laboratoire d'hydraulique proprement universitaire est due à l'élan décisif apporté par René Gosse lorsque celui-ci prend, en 1928, la direction de l'institut polytechnique. Le laboratoire s'installe dans des locaux propres en 1931 – deux ans après l'ouverture de l'école d'ingénieurs hydrauliciens dirigée par Alfred Haegelen. Une des premières études, confiée par les Ponts et Chaussées, porte sur l'ensablement du Rhône au confluent de la Saône. Une autre étude, commanditée par la Compagnie nationale du Rhône (CNR), porte sur l'aménagement hydroélectrique du fleuve. Le laboratoire, dirigé par Pierre Danel à partir de 1935, connaît un développement rapide en liaison avec des études pour la CNR (notamment sur l'envasement des voies navigables) et pour la société NBPP (vannes, cheminées d'équilibre, cavitation).

Une section d'aérodynamique est créée à la veille de la Seconde Guerre mondiale par André Fortier, ancien étudiant d'Adrien Foch à Paris, pour l'étude sur modèles réduits de la ventilation du tunnel routier de la Croix-Rousse à Lyon. Après la guerre, Fortier reparti à Paris, une petite équipe se met en place autour de Julien Kravtchenko pour l'étude de questions plus fondamentales de turbulence des écoulements. Les premiers diplômes d'études supérieures (DES) et les premières thèses sont alors soutenus. Sous l'impulsion de Kravtchenko et de Lucien Santon (ancien étudiant de Foch, comme Fortier), les laboratoires d'hydraulique et d'aérodynamique fusionnent en 1952 pour donner naissance à un laboratoire de mécanique des fluides, qui sera lui-même intégré, en 1970, dans le nouvel institut de mécanique de Grenoble (IMG)²⁰.

¹⁹ En 1955, le LDH se sépare de la société NBPP et se constitue en société filiale, la Société grenobloise d'études et aménagements hydrauliques (Sogreah).

²⁰ G. Lespinard, Trente ans de recherche en mécanique, *in* (Robert, 2001, p. 259-263).

3.2.3. La Société hydrotechnique de France (SHF)

La création en mai 1912, par la Chambre syndicale des forces hydrauliques, de la Société hydrotechnique de France (SHF) consacre l'existence d'une communauté scientifique et technique nationale autour de l'hydraulique²¹. La constitution de cette communauté est en réalité bien antérieure et peut être située en 1902, année du premier congrès de la « Houille Blanche ». Ce congrès rassemble alors à Grenoble toutes les personnalités concernées par les aménagements hydroélectriques – directeurs de sociétés, ingénieurs, fonctionnaires, universitaires –, avec pour objectif d'examiner l'ensemble des problèmes administratifs, financiers et techniques posés par ces aménagements. Les deux congrès suivants auront lieu en 1914 et 1925²².

La société créée en 1912 vise à rassembler industriels et universitaires autour de problèmes techniques auxquels les théories scientifiques offrent encore peu de solutions : installation des conduites forcées et maîtrise des « coups de bélier », mesure des gros débits, écoulement dans les canaux et évaluation des pertes de charge, rendement et régulation des turbines, gestion des crues et du transport sédimentaire, etc. Le premier président de son comité technique est Henri Bazin, hydraulicien réputé et membre de l'Académie des sciences²³.

En 1922, la SHF crée son propre laboratoire de recherches à Beauvert aux portes de Grenoble²⁴. Ce laboratoire est initialement organisé autour d'une station de tarage de moulinets hydrométriques pour la mesure de la vitesse de l'eau dans les rivières et canaux. Il est complété

²¹ Banal *et al.* (2002).

²² Les *Actes des 2^e et 3^e congrès de la Houille Blanche* sont disponibles sur le site <https://www.persee.fr/collection/jhydr>.

²³ Henri Bazin (1829–1917), polytechnicien et ingénieur du corps des Ponts et Chaussées, a été responsable du canal de Bourgogne et directeur du service des eaux de la Ville de Dijon. Auteur de plusieurs ouvrages de mathématiques et d'hydrodynamique, ses travaux sur la résistance à l'écoulement de l'eau dans les canaux découverts feront longtemps autorité. Il est élu en 1913 membre non résidant de l'Académie des sciences.

²⁴ Société Hydrotechnique de France (1922) ; Robert (2001, p. 41) ; Hager (2016).

en 1927 par un service d'essais de pompes et de turbines et d'études sur modèles réduits des ouvrages hydroélectriques. Son premier directeur est Georges Routin (1871-1937), ingénieur en chef aux ateliers Neyret-Brenier, enseignant à l'institut polytechnique et secrétaire général du comité technique de la SHF. En 1925, son nouveau directeur Paul Leroux affirme une nette orientation vers les essais : « Créé par des industriels, pour des industriels, avant tout destiné à rendre des services d'ordre pratique, c'est un établissement où les industriels peuvent, en quelque sorte, se retrouver chez eux²⁵. » On y étudie par exemple l'avantage, du point de vue des pertes de charge, des conduites en tôle soudée plutôt que rivées ; on y mesure les pertes de charge de coudes et de jonctions de conduites, ainsi que les coefficients de débit de tuyères. Dans les années suivantes, on y étudie l'affouillement à l'aval de barrages²⁶. En 1924, la SHF établit un second laboratoire à Metz, sur l'île du Saulcy, dédié à l'hydraulique fluviale et plus particulièrement à des études pour le Grand Canal d'Alsace.

3.3. L'institut de Lille

La mémoire de Pasteur. Lille est au XIX^e siècle une capitale industrielle régionale, active dans les domaines des mines, du textile et de la chimie. Son dynamisme économique est lié à une véritable politique de formation professionnelle des populations locales²⁷. La ville engage ainsi des sommes considérables dans la formation d'ouvriers et de chefs d'atelier qualifiés, dans le cadre de cours municipaux techniques et scientifiques – physique expérimentale, chimie, botanique. Une école de chimie est organisée à partir de 1824, où Frédéric Kuhlmann, élève de Louis-Nicolas Vauquelin, monte un laboratoire de recherches et installe une petite industrie. Un cours de dessin et de géométrie est ouvert vers 1830, intégré à

²⁵ Leroux (1925).

²⁶ P. Leroux, Les expériences d'hydraulique fluviale dans les laboratoires de la Société Hydrotechnique de France, Mémoires et compte rendu des travaux de la Société des ingénieurs civils de France (1931) ; sur P. Leroux, cf. Hager (2009, p. 981).

²⁷ Grelon (1996a) ; Grelon (1997).

une école des beaux-arts. Ces initiatives s'inscrivent dans le contexte d'une rivalité avec la ville voisine de Douai, centre universitaire historique et siège de l'académie à qui il s'agit de ravir le rôle de capitale intellectuelle. Un autre enjeu est de concurrencer les puissantes facultés et écoles techniques catholiques.

Au terme d'une âpre lutte contre Douai, Lille obtient en 1854 la création d'une faculté des sciences²⁸. Cette faculté dispense d'une part des cours publics et gratuits, organisés le soir « afin de permettre aux chefs de fabriques, aux contremaîtres et aux ouvriers d'y assister ». Elle dispense d'autre part un enseignement de sciences appliquées composé « de conférences et de manipulations sur toutes les branches de l'enseignement supérieur des sciences », exigeant une inscription payante. Pasteur, professeur de chimie et premier doyen de la faculté, met ainsi en place un cours sur la fabrication d'alcool et de sucre à partir des betteraves, associant conférences et travaux pratiques de laboratoire. Ces enseignements sont sanctionnés par la délivrance d'un nouveau diplôme universitaire, le brevet de capacité. La personnalité de Pasteur et le contexte industriel local font alors de Lille l'un des rares foyers de science appliquée en province – l'autre foyer important étant Lyon.

Pour la formation professionnelle, Lille cherche dès les années 1830 à ouvrir une école d'arts et métiers, sur le modèle de celles de Châlons-sur-Marne et d'Angers :

On verrait une foule de jeunes gens rechercher le bienfait d'une bonne instruction manufacturière. [...] Les industriels n'éprouveraient plus autant de difficultés à se procurer d'habiles directeurs de fabrique et des contremaîtres intelligents. Une pareille création aurait assurément une grande influence sur le développement des divers genres d'industrie²⁹.

Plusieurs projets voient le jour au cours des trois décennies suivantes, mais aucun ne parvient à s'imposer durablement, faute notamment du soutien du ministère du Commerce dont dépend l'enseignement technique.

²⁸ Plusieurs grands noms passeront à la faculté des sciences de Lille, tels le mécanicien Joseph Boussinesq (de 1872 à 1886), le physicien Pierre Duhem (de 1887 à 1891), et les mathématiciens Paul Painlevé (de 1887 à 1892) et Émile Borel (de 1893 à 1897).

²⁹ Cité par Grelon (1996a, p. 49).

À l'issue de la guerre de 1870, l'instauration d'un gouvernement conservateur va permettre aux milieux catholiques du Nord de renforcer leurs positions³⁰. Dès la promulgation, en 1875, de la loi sur la liberté de l'enseignement supérieur, un institut catholique est fondé – non par la hiérarchie religieuse mais par des laïcs et deux industriels à leur tête. L'institut, qui a rang d'université, compte dès 1877 un ensemble complet de six facultés : droit, lettres, sciences, médecine, pharmacie et théologie. Cette année-là cependant, l'arrivée au pouvoir des républicains contrarie le développement de l'institut, lui interdisant notamment, à partir de 1880, de porter le nom d'université. Une École de hautes études industrielles et commerciales voit tout de même le jour en 1885, qui délivre les premiers diplômes d'ingénieur en 1893, à l'issue de trois ans de formation. Une section d'électrotechnique y ouvre en 1912. Pour la formation des ouvriers et des contremaîtres, un institut catholique des arts et métiers (ICAM), en projet depuis 1876, est inauguré en 1898.

Le dynamisme des institutions universitaires catholiques entraîne, par réaction, la mobilisation de la Ville et du Département. Sur le modèle de l'École centrale de Paris, un institut industriel agronomique et commercial du Nord est fondé en 1872, qui devient en 1883 l'institut industriel du Nord (IDN)³¹. Pour la formation des contremaîtres, une École nationale d'arts et métiers est créée en 1881, à l'issue d'une longue bataille des collectivités locales auprès du ministère du Commerce – Bordeaux est également sur les rangs. Les crédits de l'État tardent cependant longtemps à arriver, entraînant interruption des travaux et procès, et ce n'est finalement qu'en 1900 que l'établissement ouvre enfin ses portes.

L'université de Lille, de son côté, prend son essor par la conjonction de plusieurs facteurs. Le premier est que la direction des enseignements supérieurs du ministère de l'Instruction publique considère que Lille, de par sa situation géographique et économique, doit faire partie des cinq ou six pôles universitaires régionaux forts qu'il veut promouvoir. Un deuxième facteur est qu'il ne faut

³⁰ Grelon (1996c).

³¹ Cet institut est devenu en 1991 l'École centrale de Lille.

pas abandonner la place à l'université catholique, comme l'exprime Jules Ferry lors d'un voyage à Lille en 1880 :

On a dit que la ville de Lille était, d'un certain point de vue, une citadelle du cléricisme. Messieurs, nous élevons ici citadelle contre citadelle, dans le vaste champ de la liberté³².

Le troisième facteur tient aux relais politiques dont Lille bénéficie dans la capitale, auprès de Léon Gambetta et de Jules Ferry. Les facultés sont ainsi réunies à la ville de Lille en 1887, aux dépens de Douai, puis sont érigées en université en 1896.

La nouvelle université va faire la preuve de son dynamisme par la création de deux instituts techniques : l'un de chimie en 1894, et l'autre d'électrotechnique en 1902. Un conseil de l'université du 23 juin 1897 en expose clairement les raisons :

Les étudiants qui sortent des autres facultés peuvent gagner leur vie à l'aide des diplômes qu'ils ont acquis, tandis que les jeunes gens qui ont des diplômes de sciences ne peuvent presque plus obtenir de situation du côté de l'enseignement qui était leur principal débouché. Si on ne cherche pas à leur en procurer d'autres par la création de diplômes ayant de la valeur auprès des industriels, on laissera tomber presque à rien le nombre des élèves³³.

L'institut de chimie s'inscrit dans le fil de l'école fondée par Kuhlmann un demi-siècle plus tôt ; le simple diplôme de chimiste qui sanctionne initialement les études est transformé en diplôme d'ingénieur en 1910. L'autre institut fait l'objet de la section suivante.

Premiers enseignements d'électricité industrielle. L'enseignement de l'électricité industrielle apparaît en 1892 à l'institut industriel du Nord, dans le cadre d'une filière spécifique. Cet enseignement est professé par Bernard Brunhes, maître de conférences à la faculté des sciences³⁴.

³² Grelon (1996c, p. 110).

³³ Grelon (1996c, p. 111).

³⁴ Bernard Brunhes (1867-1910), normalien, enseigne la physique successivement dans les universités de Lille, Dijon, et Clermont-Ferrand où il dirige l'observatoire du Puy-de-Dôme. Il découvre notamment les inversions du champ magnétique terrestre.

Deux ans plus tard – l’année où s’ouvre à Paris l’École supérieure d’électricité –, Brunhes crée un cours public de physique industrielle à la faculté des sciences. Il s’agit de répondre à une demande croissante de compétences dans le domaine, et de réagir aussi à la création d’un enseignement du même type à la « catho ». Brunhes quitte Lille en 1895 et son successeur Charles Camichel, jeune normilien, reprend ses cours à l’IDN et à la faculté des sciences. L’enseignement de Camichel rencontre immédiatement un vif succès comme en témoigne le doyen dans son rapport annuel :

M. Camichel, maître de conférences, a étudié dans ses deux cours de licence, l’électricité et le magnétisme. De plus, il a fait chaque semaine une conférence aux candidats à l’agrégation. M. Camichel a été chargé, en outre, du cours de physique industrielle ; il a traité dans ce cours la question de l’éclairage. Dès que la découverte de Röntgen fut connue [les rayons X], M. Camichel en a exposé les expériences les plus curieuses dans une conférence qu’il a dû répéter pour satisfaire l’affluence du public. Il a fait en outre des conférences sur le même sujet dans plusieurs villes du ressort [de l’académie]³⁵.

Un certificat de physique industrielle est ouvert en 1897, que Camichel prend en charge en même temps qu’il met sur pied un laboratoire. Le cours public est alors remplacé par deux conférences hebdomadaires sur l’année, auxquelles s’ajoute une conférence semestrielle. L’enseignement théorique est complété par des séances de travaux pratiques de quatre heures hebdomadaires et par des excursions dans les usines de la ville et des environs. Parmi les douze certificats alors délivrés par la faculté, celui de physique industrielle trouve rapidement une bonne place comme en témoigne, trois ans après sa création, le rapport annuel du conseil de l’université :

Neuf [inscrits] pour le certificat de calcul différentiel, 16 pour la mécanique rationnelle, 4 pour l’astronomie, 10 pour la mécanique appliquée, 10 pour la physique générale, 18 pour la physique industrielle, 29 pour la chimie générale, 26 pour la chimie appliquée, 18 pour

³⁵ Rapport annuel du conseil de l’université de Lille pour l’année 1895-1896.

la minéralogie, 11 pour la zoologie, 9 pour la botanique et 6 pour la géologie.

Comme on le voit, les certificats les plus recherchés, sont ceux qui touchent de plus près à l'industrie, ce qui n'est pas étonnant dans notre région. Cependant, il est à remarquer que les laboratoires de sciences pures n'ont pas été désertés³⁶.

La physique industrielle se tient donc derrière la chimie qui reste dominante mais devant les certificats de mathématiques, de mécanique et de physique – en général les plus courus. Cet enseignement est également accessible aux élèves non-bacheliers, qui ne peuvent prétendre à la licence mais obtiennent un brevet d'études électrotechniques.

Camichel quitte Lille en novembre 1900 pour un poste à Toulouse. Ses années lilloises l'auront convaincu de l'importance des relations entre université, municipalité et industrie, comme il s'en souviendra beaucoup plus tard lors de son entrée à l'Académie des sciences en 1936 :

C'est à Lille que j'ai compris la nécessité des relations des Universités et des Villes [...] et aussi de l'adaptation d'un service universitaire à la région, ou, ce qui revient au même, la liaison entre l'usine et le laboratoire³⁷.

L'institut électrotechnique. Les enseignements de Camichel à Lille sont repris par René Swyngedauw (1867-1956), maître de conférences de physique. En 1902, Swyngedauw obtient la création d'un diplôme d'ingénieur électricien et réorganise le simple « service » de physique industrielle en institut³⁸. Cet institut est installé rue des Fleurs où Pasteur avait créé la faculté des sciences en 1854. Il délivre un brevet d'études électrotechniques, à l'issue d'une année d'études, et un diplôme d'ingénieur

³⁶ Rapport annuel du conseil de l'université de Lille pour l'année 1899-1900. Le nombre d'étudiants inscrits à la faculté des sciences est cette année-là de 165, dont 86 pour les certificats de licence, 65 pour le certificat PCN (qui prépare aux études de médecine), et 3 en doctorat.

³⁷ C. Camichel, *in* Association Amicale des Ingénieurs Anciens Élèves de l'IETMA de Toulouse (1936, p. 48).

³⁸ Rapport annuel du conseil de l'université de Lille pour l'année 1901-1902.

électricien après trois années. Son développement est encouragé par des aides du conseil départemental et de la Ville, ainsi que par l'Association des amis de l'université qui compte de nombreux industriels. Une chaire de physique industrielle est créée en 1905, financée en partie par le conseil départemental du Nord, et attribuée à Swyngedaaw.

Swyngedaaw expose ses idées sur l'enseignement technique universitaire en 1905 dans la *Revue générale des sciences pures et appliquées*³⁹. Il y présente notamment l'organisation de son institut :

L'enseignement théorique est donné par les professeurs de la Faculté. Il comprend l'étude des Mathématiques générales, de la Physique générale, de l'Électrotechnique, de la Physique industrielle et de la Mécanique appliquée, avec des travaux pratiques coordonnés à l'enseignement. [...] L'enseignement technique est donné par des ingénieurs et des praticiens ; il comprend : 1° le dessin industriel ; 2° des essais de machines ; 3° des conférences techniques, des projets, des visites d'installations électriques et des stages dans les diverses usines de la région.

Les essais de machines font l'objet d'un long développement :

Les essais de machines, de canalisations, d'accumulateurs, sont extrêmement variés et adaptés aux cours [...]. Un rapport soigneusement rédigé, avec un tracé correct de courbe s'il y a lieu, est exigé après chaque essai. [...] Ces essais sont faits sur des machines et des installations comparables par leur puissance à celle que l'on rencontre dans l'industrie. Les laboratoires d'essais, dont la superficie atteint 300 mètres carrés, commencés en 1896 par M. Camichel, comprennent aujourd'hui une salle de génératrices et une autre de réceptrices, et une salle de haute tension [...].

Le contenu des conférences techniques est ensuite détaillé :

Les conférences techniques sont faites tous les ans par des ingénieurs sur les matières suivantes : 1° Construction et calcul des dynamos et

³⁹ Swyngedaaw (1905).

alternateurs ; 2° Accumulateurs ; 3° Distribution d'énergie ; 4° Éclairage ; 5° Applications mécaniques de l'électricité ; 6° Entretien et accidents des dynamos ; 7° Traction ; 8° Télégraphie et téléphonie ; 9° Constructions industrielles.

Les cours publics, dont l'importance dans les facultés tend à diminuer, demeurent une préoccupation vivante :

L'un des cours d'Électrotechnique est ouvert au public pendant un trimestre ; il est destiné à faire connaître aux ingénieurs et aux industriels de la région de Lille, qui ne sont pas des spécialistes en Électricité, les applications les plus importantes et les plus intéressantes pour la région. [...] Depuis octobre 1902, époque à laquelle l'organisation décrite a été mise en vigueur, le nombre des élèves ingénieurs est passé de 6 à 20, et, parmi eux, nous trouvons des ingénieurs des Mines, d'anciens élèves de l'École polytechnique, des élèves diplômés de l'Institut industriel du Nord. Grâce à un Comité de patronage, les élèves sortis ont été placés dans l'industrie régionale et y sont vivement appréciés.

Difficultés de l'après-guerre. La Première Guerre mondiale et l'occupation allemande portent un coup d'arrêt brutal au développement universitaire lillois⁴⁰. L'institut électrotechnique, en particulier, est ravagé par un incendie en août 1914. Les efforts de Swyngedauw pour rassembler les fonds considérables nécessaires à la reconstruction ne pourront aboutir, du fait des difficultés économiques de l'après-guerre et de l'insuffisance du soutien des collectivités locales. Celles-ci, en effet, tergiversent compte tenu de l'existence concurrente de formations en électrotechnique dans deux autres établissements lillois, l'IDN et la « catho ». Swyngedauw se tourne alors vers l'École nationale des arts et métiers, où il reconstitue un laboratoire. Poursuivant ses tractations avec l'université et le ministère, il parvient à faire ouvrir en 1924 un institut électromécanique. Une formation complémentaire d'une année y est offerte aux licenciés de l'université et aux diplômés de l'IDN et des Arts et Métiers. Cet institut ne connaîtra cependant pas les succès de ses homologues de Nancy, Grenoble et Toulouse.

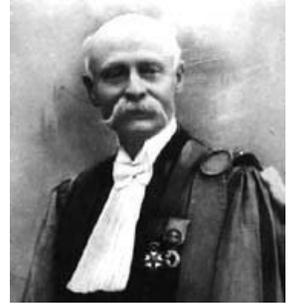
⁴⁰ Grelon (1996b).

René Swyngedauw (1867-1956)

René Swyngedauw, né à Boeschepe en Flandre française, licencié ès sciences physiques et ès sciences mathématiques en 1887 et 1888, obtient en 1893 l'agrégation de sciences physiques. Il soutient en 1897 une thèse de doctorat ès sciences à la faculté des sciences de Lille, sur les décharges électriques^a.

Préparateur attaché à la chaire de physique de la faculté des sciences (1888), puis maître de conférences (1895), Swyngedauw reprend en 1900 les enseignements du certificat de physique industrielle laissés par Camichel.

Il oriente alors ses recherches vers les machines tournantes à courant continu et à courant alternatif, ainsi que sur le transport de l'énergie électrique. Swyngedauw fonde en 1902 l'institut électrotechnique de Lille. Il est cette année-là nommé professeur adjoint de physique, puis obtient, en 1905, la nouvelle chaire de physique et électricité industrielle qu'il conserve jusqu'à sa retraite en 1937. L'institut électrotechnique ayant été détruit par un incendie en 1914, Swyngedauw reconstitue après la guerre un laboratoire dans les locaux de l'ENSAM, autour duquel il fonde en 1924 l'institut électromécanique de Lille. À partir de 1927, il réoriente ses recherches vers les transmissions mécaniques par courroie et vers les paliers tournants à billes, travaux pour lesquels il obtient le prix Montyon de l'Académie des sciences. Il est nommé officier de la Légion d'honneur en 1937.



a. <https://asap.univ-lille.fr/ASAP/>

Chapitre 4

L'institut électrotechnique de Toulouse

- Allume l'électricité.
- L'électricité dans la chambre d'un mort ? Tu n'y es plus !
- Pourquoi pas ? Faut bien y voir.
- Pour ce qu'il y a à voir, je n'y tiens pas. Vous n'avez pas un bout de bougie, que je puisse chercher ?
- Est-ce que tu sais ce que tu veux ? Allume l'électricité, je te dis, tu y verras plus clair qu'avec un bout de bougie.
- C'est ce que je ne veux pas justement.

Jean Giono, *Les Âmes fortes*, 1950

L'enseignement de l'électricité industrielle naît à Toulouse en 1902 à l'initiative de Charles Camichel, personnalité à l'origine de la création, cinq ans plus tard, d'un institut électrotechnique qui marquera profondément la faculté des sciences de Toulouse. Ce chapitre couvre les premières années de cet institut jusqu'à son tournant, en 1913, vers l'hydraulique et la mécanique appliquée.

4.1. Synergies universitaires et municipales

Au début du xx^e siècle, la ville de Toulouse est une métropole régionale de 150 000 habitants, essentiellement agricole et peu industrialisée. Éloignée des sources d'énergie et notamment des mines de houille, elle est jusque-là restée à l'écart du développement industriel. Son université,

créée en 1229, a été supprimée à la Révolution, comme les autres universités françaises. Les facultés renaissent et se réorganisent cependant peu à peu sous le Consulat puis l'Empire napoléonien – la faculté de droit, la plus dynamique, renaît en 1806 –, mais, faute de moyens, leur activité consiste essentiellement à organiser le baccalauréat et dispenser des conférences mondaines. Ainsi les facultés de droit, lettres et sciences ne délivrent, entre 1810 et 1879, que 193 diplômes de licence (soit moins de trois par an) et 16 doctorats – la plupart en droit. La situation évolue profondément à partir des années 1880¹.

4.1.1. Réveil universitaire

Dans le contexte des premières élections municipales, le « haut enseignement » devient un enjeu régional, à Toulouse comme dans les autres grandes villes françaises. L'accès des facultés à la personnalité morale, qui leur permet de recevoir dons et subventions, encourage les initiatives. L'objectif que visent alors les élus toulousains, tous bords politiques confondus – conservateurs, républicains modérés et radicaux socialistes –, est de promouvoir leur cité parmi le petit nombre de centres universitaires que le ministère de l'Instruction publique veut instaurer dans les régions. La partie n'est pas facile compte tenu de la proximité des métropoles concurrentes de Bordeaux et Montpellier, et sera gagnée par la conjugaison de plusieurs facteurs : le poids national de Jean Jaurès, député et maître de conférences à la faculté des lettres, celui du recteur Claude-Marie Perroud, proche de Louis Liard au ministère, et la détermination des acteurs politiques et universitaires locaux.

En 1885, la municipalité dirigée par l'imprimeur Joseph Sirven, républicain et fondateur du quotidien régional *La Dépêche*, décide ainsi l'édification de nouveaux bâtiments pour les facultés, en bordure du Jardin des Plantes. L'École de médecine est elle-même transformée en faculté – vieille revendication toulousaine. Elle ouvre ses portes en 1891, inaugurée par le Président de la République, Sadi Carnot, accompagné par Jaurès,

¹ Nye (1986, chap. 4) ; Devaux (2020) ; Barrera & Grossetti (2020a).

maire-adjoint. Une longue période de forte croissance s'ouvre. Le nombre d'étudiants croît ainsi, pour la faculté des sciences, de 40 en 1879 à 250 en 1900, tandis que le nombre de chaires passe de huit à seize entre 1890 et 1910². Le charisme de l'astronome Benjamin Baillaud, arrivé en 1878 et élu doyen l'année suivante, attire de brillants jeunes enseignants³. C'est ainsi qu'arrive en 1882 Paul Sabatier (1854-1941), normalien et agrégé de sciences physiques, ancien élève de Marcelin Berthelot au Collège de France (cf. encadré biographique). Sabatier s'impose rapidement par ses qualités scientifiques, et obtient la chaire de chimie deux ans plus tard. Ardent promoteur d'une science au service de la société et de l'économie, il brevète plusieurs inventions et procédés, et initie en 1888 un cours de chimie agricole et industrielle. Sabatier est aussi républicain conservateur et catholique militant : lorsque le doyen Baillaud le propose en 1885 comme son successeur, le recteur Perroud s'y oppose : « ses opinions et ses croyances le situent un peu trop à l'extérieur du camp laïc », écrit-il à son ministre⁴. C'est le botaniste Mathieu Leclerc du Sablon qui lui est préféré⁵.

² Barrera (2020c, p. 230). La moitié environ des étudiants de la faculté des sciences sont inscrits en vue du certificat PCN (de sciences physiques, chimiques et naturelles), requis pour poursuivre des études de médecine.

³ Benjamin Baillaud (1848-1934), normalien, est nommé chargé de cours à la faculté des sciences de Toulouse en 1878. L'année suivante, il prend la direction de l'Observatoire de Jolimont et il est nommé doyen de la faculté des sciences – il a 31 ans. Il fait évoluer l'Observatoire du Pic du Midi, créé en 1882 et jusque-là dédié à la météorologie, vers les observations astronomiques. Il quitte Toulouse en 1908 pour prendre la direction de l'Observatoire de Paris, et est élu à l'Académie des sciences. Il fonde et préside l'Union astronomique internationale et reçoit la médaille Bruce en 1923. Deux de ses enfants seront eux-mêmes astronomes.

⁴ Nye (1986, p. 137) ; Grossetti & Milard (1996, p. 139).

⁵ Mathieu Leclerc du Sablon (1859-1944), normalien (1879) et agrégé de sciences naturelles (1882), est chargé de cours (1889) puis professeur de botanique (1891) à la faculté des sciences de Toulouse. Doyen de la faculté de 1894 à 1905 (entre Benjamin Baillaud et Paul Sabatier), il est élu correspondant de l'Académie des sciences en 1920.

Paul Sabatier (1854-1941)

Né le 5 novembre 1854 à Carcassonne, Paul Sabatier est reçu en 1874 à l'École polytechnique et à l'École normale supérieure, et choisit cette dernière^a. Agrégé de sciences physiques en 1877, il enseigne à Nîmes une année puis entreprend une thèse sous la direction de Marcelin Berthelot au Collège de France, thèse intitulée *Recherches thermiques sur les sulfures* qu'il soutient en 1880. Atomiste convaincu et admirateur de Mendeleïev, Sabatier s'oppose à son puissant maître Berthelot, partisan de la théorie, pourtant dépassée, des équivalents. Il doit, pour poursuivre ses recherches, s'éloigner de Paris et obtient un poste de maître de conférences de physique à la faculté des sciences de Bordeaux. Il y reste deux ans puis obtient un poste à la faculté de



Toulouse, de chargé de cours de physique, puis de chimie. Deux ans plus tard, en 1884, le titulaire de la chaire de chimie générale décède et Sabatier lui succède – il a juste trente ans. Soucieux du service à la société – troisième mission prescrite aux universitaires, avec l'enseignement et la recherche –, il inaugure en 1888 un cours public de chimie agricole. Ses travaux personnels portent sur la chimie physique et la chimie minérale, puis, à partir de 1895, sur la synthèse de molécules organiques par l'action catalytique de poudres métalliques, en collaboration avec Jean-Baptiste Senderens, chanoine et directeur de l'École supérieure des sciences de l'institut catholique de Toulouse.

Sabatier, assesseur du doyen de la faculté des sciences depuis 1886, devient lui-même doyen en 1905. Amplifiant une orientation donnée par son prédécesseur, il promeut le développement des sciences appliquées notamment par la création de trois instituts techniques : électrotechnique, chimique, et agricole. Élu correspondant de l'Académie des sciences en 1905 (après en avoir été deux fois lauréat), il en devient « membre non résidant » en 1913 – statut nouvellement créé pour les non-parisiens.

En 1912, il reçoit le prix Nobel de chimie (partagé avec le Nancéien Victor Grignard) pour ses travaux sur l'hydrogénation par catalyse des composés organiques. Doyen jusqu'en 1930, année où il prend sa retraite, Sabatier conserve encore quelques années la direction de l'institut de chimie, et enseigne jusqu'en 1939. Grand officier de la Légion d'honneur, honoré de nombreuses distinctions françaises et étrangères, Sabatier était aussi un homme profondément catholique et attaché au développement de sa région. Il décède à Toulouse en 1941.

a. Nye (1986, p. 137-153) ; Lattes (2019).

En dépit du peu de moyens dont disposent les laboratoires, la recherche scientifique est devenue au tournant du siècle une mission majeure de l'université, comme le rappelle le rapport annuel du conseil de l'université :

Assurément la situation prise à ce point de vue par l'Université de Toulouse dans le monde savant est des meilleures parmi les Universités françaises. Elle n'oublie pas, ses diverses publications en font foi, que la recherche scientifique sous toutes ses formes est, à côté de l'enseignement, son premier devoir⁶.

Le nombre annuel de publications, de l'ordre d'une demi-douzaine par chaire (une douzaine pour Sabatier), croît en effet notablement. Il s'agit d'articles de revues (notamment de notes aux *Comptes rendus de l'Académie des sciences*), de bulletins de sociétés savantes, de mémoires divers, et d'ouvrages pédagogiques. Ces publications sont nationales pour la plupart, mais certaines d'entre elles sont accueillies par des revues étrangères, notamment allemandes pour Sabatier – il n'existe pas encore de grandes revues internationales. Enfin, se manifeste le souci de développer des échanges avec l'extérieur, comme en témoigne le doyen de la faculté Mathieu Leclerc du Sablon :

Chaque nouveau professeur, ayant fait son éducation scientifique dans un milieu différent du nôtre et souvent auprès de maîtres éminents, nous arrive avec des idées, des méthodes, des habitudes qui rajeunissent l'enseignement et la recherche ; c'est là l'avantage incontestable des mutations dans le personnel des diverses Universités. Dans l'état actuel, un des meilleurs moyens de lutter contre l'isolement qui nous menace, est d'entretenir des relations, aussi fréquentes que possible, avec les autres Universités françaises et étrangères⁷.

⁶ B. Baillaud, directeur de l'Observatoire, *Rapport annuel du conseil de l'université de Toulouse* (ci-après désigné *Rapp. UT*) pour l'année scolaire 1900-1901, p. 9.

⁷ M. Leclerc du Sablon, *Rapp. UT 1900-1901*, p. 137.

4.1.2. Les sciences appliquées

Les sciences appliquées sont l'objet d'une attention particulière. Ainsi, déclare le doyen :

L'avenir est du côté des étudiants se destinant aux carrières industrielles : ce sont ceux-là que nous devons attirer et retenir pour assurer la prospérité de notre faculté⁸.

De solides formations scientifiques et techniques pour les ouvriers, contremaîtres et ingénieurs, poursuit le doyen, attireront les entrepreneurs et contribueront au développement économique régional. Cette idée, sans être spécifique à Toulouse (cf. chap. 2), trouve ici un écho exceptionnel. Les rapports annuels du conseil de l'université, introduits par un professeur de l'une des facultés à tour de rôle, y reviennent régulièrement. Sciences pures et appliquées sont complémentaires, déclare ainsi le doyen de la faculté des sciences à propos des travaux sur une maladie de la vigne de son collègue le botaniste Alphonse Prunet :

C'est en appliquant à l'étude du black-rot [pourriture noire] les procédés ordinaires des recherches, employés dans les laboratoires de botanique pour l'étude de sujets qui n'ont pas d'application pratique, que M. Prunet a résolu une question qui semblait être une question de pratique, mais que les hommes de pratique étaient impuissants à résoudre⁹.

La distinction entre les deux types de sciences n'est pas même pertinente poursuit le doyen, s'appuyant sur la figure tutélaire de Pasteur :

Cette distinction entre la science pratique et la science théorique ne doit pas être faite, parce qu'elle n'existe pas. Tous les résultats pratiques pour lesquels la science a transformé les conditions de la vie pendant ce siècle ont été la conséquence d'études d'abord désintéressées : les premiers travaux de Pasteur paraissaient exclusivement théoriques, et personne,

⁸ M. Leclerc du Sablon, *Rapp. UT 1896-1897*, cité par Barrera & Jalaudin (2020, p. 473).

⁹ M. Leclerc du Sablon, doyen de la faculté des sciences, *Rapp. UT 1899-1900*, p. 257.

au moment où ils étaient publiés, ne pouvait soupçonner les conséquences pratiques qu'un homme de génie pourrait en tirer. Qui se serait douté que l'étude des carbures métalliques pourrait amener une révolution dans l'industrie de l'éclairage ? [...] Les Facultés des sciences se tournent résolument du côté des applications ; la rigueur scientifique des recherches n'y perdra rien, mais les services rendus au pays seront plus considérables¹⁰.

Les sciences agricoles s'introduisent ainsi à la faculté des sciences en 1888 avec un cours public de chimie agricole, où Sabatier attire un auditoire nombreux dans le vieil amphithéâtre de la rue Lakanal. En 1894, une station d'essais des semences et de pathologie végétale est créée par le botaniste Alphonse Prunet, lequel est nommé quatre ans plus tard sur une chaire de botanique agricole. La zoologie agricole est enseignée à partir de 1901 et associée à une station de pisciculture et d'hydrobiologie dirigée par Louis Roule puis par Léon Jammes. Une station de mécanique agricole apparaît bientôt, associée à une chaire magistrale. Ces initiatives concourent à la création en 1909 d'un institut agricole dont le premier directeur est Prunet, administrateur énergique et scientifique réputé¹¹. Financé par le ministère de l'Agriculture, la Ville, le Département et par diverses sociétés agricoles et horticoles, l'institut est habilité, cinq ans plus tard, à délivrer un diplôme d'ingénieur.

La chimie appliquée est enseignée dès 1889 par Charles Fabre, puis fait l'objet d'un certificat à partir de 1896. Un institut de chimie, habilité à délivrer un diplôme d'ingénieur chimiste, est ouvert en 1906, naturellement dirigé par Sabatier¹². Le cours de chimie appliquée est transformé en chaire magistrale l'année suivante. L'« institut de chimie », ainsi qu'on prend l'habitude de l'appeler, reste juridiquement un ensemble de « services » comme on en trouve autour d'autres chaires ; il ne sera formellement constitué en institut qu'en 1950, à la veille de sa transformation en École nationale supérieure d'ingénieurs (ENSI).

¹⁰ M. Leclerc du Sablon, *ibid.*, p. 258.

¹¹ Albertini (2010, p. 207-209) ; A. Prunet, *Rapp. UT 1909-1910*, p. 7-12.

¹² Nye (1986, chap. 4) ; Lattes (2019).

La physique appliquée est quant à elle enseignée depuis 1896 par le titulaire de la chaire de physique, Henri Bouasse, dans le cadre d'un certificat. Cet enseignement n'attire cependant que de rares étudiants – un seul certificat est délivré entre 1900 et 1920. Au niveau élémentaire, l'électricité industrielle est enseignée à l'école primaire supérieure de Toulouse à partir de 1901, sous la forme d'un cours pratique subventionné par la municipalité¹³. L'essor véritable de la discipline et son couronnement par la création d'un institut électrotechnique, discutés ci-après, seront l'œuvre de Charles Camichel.

Les trois instituts ainsi créés par la faculté des sciences entre 1906 et 1909 – dans les sciences agricoles, la chimie et l'électrotechnique – témoignent qu'en deux décennies l'université de Toulouse a accompli une mutation considérable. La vieille cité de juristes est devenue, à la veille de la Première Guerre mondiale, un pôle français des sciences appliquées aux côtés de Nancy, Grenoble et Lille.

4.2. Genèse de l'institut électrotechnique

L'arrivée de Charles Camichel à la faculté des sciences de Toulouse, en 1900, va donner à l'électricité industrielle un essor exceptionnel. L'institut électrotechnique bientôt créé, avec l'appui de Sabatier et de la municipalité, sera longtemps la plus grande fierté de la faculté des sciences.

4.2.1. Charles Camichel

Charles Camichel est né le 15 septembre 1871 à Montagnac dans l'Hérault, quatrième enfant d'un père pasteur protestant et d'une mère artiste et musicienne¹⁴. Brillant élève, il est en 1889 reçu simultanément à l'École polytechnique et à l'École normale supérieure (ENS), et choisit cette dernière. Il obtient l'agrégation de sciences physiques en 1892 – benjamin cette année-là des agrégés de France,

¹³ *Bulletin municipal* du 15 janv. 1903, p. 11.

¹⁴ Arch. nat. F17 24857 ; Arch. Acad. sc., dossier Camichel ; Escande (1966). Quelques éléments supplémentaires de biographie familiale sont donnés dans l'Annexe C.

toutes disciplines confondues. Il prépare ensuite une thèse au laboratoire de physique de l'École normale sous la direction de Marcel Brillouin, sur l'absorption de la lumière par les cristaux, thèse soutenue le 13 février 1895¹⁵. Au contact de son maître vénéré, « homme si modeste et si grand, dira-t-il, dont j'ai été successivement l'élève, le préparateur, et qui a exercé sur moi une influence constante¹⁶ », il acquiert un savoir-faire expérimental en optique qu'il mettra à profit lorsqu'il se tournera plus tard vers l'hydrodynamique. Après un bref passage au lycée de Rennes, il est nommé en mars 1895 maître de conférences à la faculté des sciences de Lille où il développe l'enseignement de la physique industrielle (cf. chap. précédent). Il y reste cinq années. « Il allait être nommé titulaire lorsque la santé de sa femme l'obligea à demander un poste dans le Midi », dira Sabatier¹⁷. C'est ainsi que sur la recommandation de Brillouin à Sabatier, Camichel est retenu en 1900 pour la maîtrise de conférences de physique à la faculté des sciences de Toulouse – maîtrise libérée par Aimé Cotton lui-même nommé à Paris (Figure 4.1).

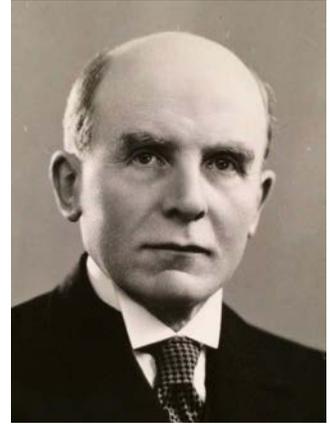


Figure 4.1 Charles Camichel (photo non datée). Arch. Acad. sc.

4.2.2. Essor de l'enseignement de l'électricité

Camichel, fort de son expérience lilloise, convainc la faculté de proposer à l'université la création d'un cours complémentaire d'électricité industrielle¹⁸. L'université adopte la proposition en juillet 1902 et vote un crédit de 1 000 francs. Dans le rapport annuel du conseil de

¹⁵ Camichel (1895).

¹⁶ Réponse de M. Charles Camichel aux discours en son honneur lors de sa réception à l'Institut, *in* (Association Amicale des Ingénieurs Anciens Élèves de l'IETMA de Toulouse, 1936, p. 47). Marcel Brillouin (1854-1948), normalien et agrégé de sciences physiques, docteur ès sciences mathématiques en 1880 et docteur ès sciences physiques en 1882. Professeur à la faculté des sciences de Toulouse de 1883 à 1887, il rejoint ensuite l'ENS, puis est nommé professeur au Collège de France à partir de 1900, sur la chaire de physique générale et mathématique. Il est auteur de contributions importantes à l'hydrodynamique des écoulements potentiels, avec Tullio Levi-Civita et Henri Villat. Son fils Léon Brillouin sera lui-même professeur au Collège de France à partir de 1932.

¹⁷ *La Dépêche* du 22 juill. 1906. Arch. ENSEEIHT.

¹⁸ Camichel publie ses vues sur la question dans une brochure, *Le Laboratoire Scientifique et l'Usine*, 1902, Éd. Privat.

l'université, le rapporteur général, professeur à la faculté de lettres, note ainsi :

Nul n'ignore que des rapports de plus en plus fréquents relient l'industriel et le savant. [...] La région des Pyrénées réclame l'exploitation industrielle par la qualité des minerais qu'elle renferme et l'abondance de ses chutes d'eau. [...] Nous avons donc pensé qu'un enseignement d'électricité industrielle, en vulgarisant les connaissances techniques et en suscitant de nouvelles applications de l'électricité, tirerait notre région de l'engourdissement qui la menace, et nous avons espoir, qui ne semble pas chimérique, de voir bientôt Toulouse au nombre des villes industrielles de premier ordre. Notre Faculté doit être le foyer toujours alimenté de cette transformation¹⁹.

Le cours, public, donné à raison d'une leçon hebdomadaire en soirée, rencontre immédiatement un succès considérable, comme en témoigne le doyen :

Grâce au zèle infatigable du professeur, le succès de ce nouvel enseignement a dépassé toutes les prévisions ; depuis le mois de novembre jusqu'au mois d'avril, plus de deux cents auditeurs appartenant aux catégories les plus diverses ont assisté aux leçons du mercredi soir. Le grand amphithéâtre était trop étroit, les derniers venus n'y trouvaient plus de place²⁰.

Parmi les auditeurs se trouve un jeune professeur de droit civil, Joseph Gheusi, futur député radical et recteur d'Académie. Trente ans plus tard, ses souvenirs sont encore vifs :

La curiosité aidant, j'assistais à ce cours qui comportait une vingtaine de leçons. [...] Et je me rappelle tout l'intérêt que nous prenions à cet enseignement si vivant, déjà destiné à une large emprise sur le monde réel, soulignant l'asservissement de celui-ci aux besoins humains. Les groupes divers qui le suivaient constituaient un auditoire d'environ trente assidus appartenant à des professions ou métiers fort divers, car ce n'était point des étudiants inscrits dans nos diverses Facultés, mais bien des personnes appartenant à des

¹⁹ M. Zyromski, professeur à la faculté de lettres, *Rapp. UT 1901-1902*, p. 10-12.

²⁰ M. Leclerc du Sablon, *Rapp. UT 1902-1903*, p. 113.

organisations industrielles ou commerciales, allant de l'employé des postes au conducteur des ponts et chaussées, au monteur mécanicien, à l'appareilleur, etc. ; tous, dans l'armée active du travail²¹.

En dépit de son succès, ce cours est interrompu l'année suivante sur intervention du recteur Perroud. Celui-ci convient qu'un enseignement électrotechnique « réclame sa place dans notre Université », mais considère que cet enseignement doit rester pratique, contrairement à Camichel qui a en vue, au-delà du cours public, la formation d'ingénieurs. Ainsi, se justifie Perroud :

Nous ne songeons pas à faire des ingénieurs ; nous nous estimerions heureux si nous parvenions à former d'abord de bons ouvriers, puis de bons contremaîtres, sachant comment se comporte la force qu'ils manient, et comment il faut la conduire²².

Une autre raison de la mise à l'écart de Camichel, non explicitée, est que Perroud cède aux pressions du titulaire de la chaire de physique, Henri Bouasse, qui voit d'un mauvais œil la concurrence de son jeune collègue. Le prétexte avancé par Perroud, selon lequel Camichel aurait lui-même souhaité se décharger du cours pour se consacrer à ses recherches, ne trompe personne. Contrainte de s'exécuter, la faculté transforme le cours en séances de travaux pratiques pour des ouvriers et contremaîtres. Il est confié à Bouasse qui en expose les lignes directrices au conseil de la faculté :

Cet enseignement se composerait de deux leçons par semaine (lundi et mercredi à 8h1/4 du soir), composées d'expériences faites et commentées devant les élèves et répétées si possible par eux. [...] Le nombre des auditeurs admis serait de 15 à 20 au maximum²³.

²¹ Allocution de M. le Recteur Gheusi à la cérémonie de remise de l'épée d'académicien, *in* (Association Amicale des Ingénieurs Anciens Élèves de l'IETMA de Toulouse, 1936, p. 17-22). J. Gheusi (1870-1950) est député radical-socialiste de 1908 à 1914 puis de 1919 à 1924 ; il est ensuite recteur d'Académie successivement à Clermont-Ferrand (1924-1926), Lyon (1926-1931) et Toulouse (1931-1937) (Condette, 2006, p. 198).

²² C. Perroud, recteur, *Rapp. UT 1903-1904*, p. 9-10 ; Arch. nat. F17 29049.

²³ H. Bouasse, lettre du 22 juill. 1903 au conseil de la faculté des sciences.

Le cours, exclusivement expérimental, n'est donc plus public, il s'adresse à un petit nombre d'auditeurs inscrits ; Bouasse le conduit ainsi durant quatre années. Camichel n'en continue pas moins de donner des conférences publiques du soir ; pour l'année 1905-1906, ses trois conférences portent sur « Le problème de l'éclairage, son évolution » ; « L'éclairage moderne » ; « Fluorescence et phosphorescence ».

4.2.3. Mobilisation municipale

L'accession de Sabatier à la tête de la faculté en 1905 et, l'année suivante, l'arrivée des socialistes à la mairie de Toulouse vont offrir un contexte favorable à un renversement de la situation. Le nouveau maire, Albert Bedouce (1869-1947), est un autodidacte d'origine populaire dont la conscience politique a été éveillée par les cours publics de philosophie donnés par Jaurès. Entré au conseil municipal en 1896, orateur éloquent, il est élu maire à l'âge de 37 ans, premier maire socialiste de la ville. Bedouce partage les convictions progressistes de Sabatier et Camichel. Entré dans la franc-maçonnerie en 1904 et membre de la loge *L'harmonie sociale*, il est pétri de rationalisme et de foi dans la science :

Être patriote, affirme-t-il en 1913, c'est développer la Nation par la production, par l'industrie, par la culture, par la raison²⁴ !

Bedouce est ainsi convaincu que la « houille blanche » des Pyrénées offre un potentiel de développement considérable et que Toulouse est appelée à devenir la capitale d'une importante région industrielle. Il faut pour cela former des ouvriers et des contremaîtres, et donc ouvrir à la

²⁴ Cité par Grossetti & Milard (1996, p. 145). Albert Bedouce (1869-1947) est né à Toulouse d'une mère blanchisseuse et d'un père inconnu. Auditeur des conférences publiques de philosophie de Jean Jaurès, autodidacte, syndicaliste, il est élu conseiller municipal à l'âge de 27 ans. Premier maire socialiste de Toulouse en 1906, il est élu député quelques mois plus tard. Il fait sept mandats à la Chambre (de 1906 à 1919 puis de 1924 à 1942) et devient en 1936 ministre des Travaux publics du gouvernement du Front populaire. À la Libération, il est frappé d'inéligibilité pour avoir voté les pleins pouvoirs à Pétain en 1940. Décédé en 1947, il sera amnistié à titre posthume en 1963.

faculté un nouveau cours public d'électricité industrielle. Bedouce s'en explique dans un long discours au conseil municipal, en juillet 1906 :

Les découvertes faites pendant ces vingt dernières années, dans le domaine de l'électrotechnique, ont montré toute l'importance des chutes d'eau au point de vue industriel. [...]

Ces richesses hydrauliques se trouvent en France principalement dans le Dauphiné, qui est devenu en ces dernières années très prospère, et dans notre région des Pyrénées, qui le deviendra bientôt. Les Pyrénées renferment, en effet, de nombreuses mines (fer, cuivre, zinc, gypse, marbre), qui seront faciles à exploiter le jour où les installations hydroélectriques distribueront dans toutes nos régions l'énergie motrice et permettront de créer, partout où cela sera nécessaire, des moyens de transport. [...]

Toulouse est donc appelée à devenir, dans peu de temps, la capitale d'une région industrielle très importante. Il est indispensable de donner aux ouvriers qui vont être utilisés, une instruction assez complète pour éviter qu'ils ne deviennent les rouages inconscients de leur usine ; il faut, au contraire, qu'ils dominent leurs machines de toute la hauteur de leurs intelligences. Le progrès industriel ne doit pas avoir pour conséquence l'abaissement intellectuel des travailleurs. La création d'un enseignement technique municipal s'impose donc²⁵.

Fort de l'appui de son conseil, le maire propose alors au doyen Sabatier la création, non plus seulement d'un enseignement, mais d'une chaire municipale d'électricité industrielle, et lui demande de transmettre cette proposition au conseil de l'université²⁶. Le conseil de la faculté convoqué par Sabatier se déclare favorable au projet, à l'unanimité. Sabatier transmet alors cet avis, accompagné de la lettre du maire, au recteur qui doit réunir son conseil le lendemain. « Je tiens, ajoute-t-il, au nom de la Faculté des sciences et aussi en mon nom personnel, à exprimer à la municipalité de Toulouse toute notre gratitude pour

²⁵ *Bulletin municipal* n° 9, 31 juill. 1906, p. 155-156.

²⁶ Procès-verbal de la séance du 18 juill. 1906 du conseil de la faculté.

l'idée qui a inspiré ce projet [...] ». Mais le recteur, réticent, ne met pas la question à l'ordre du jour, alléguant que la procédure ne respecte pas les formes nécessaires.

Le quotidien régional *La Dépêche* s'empare de l'affaire et publie, le 21 juillet, la lettre par laquelle le doyen Sabatier annonçait au maire le vote favorable de la faculté. Le lendemain, *La Dépêche* publie un entretien que Sabatier a accordé à l'un de ses journalistes. Cet entretien (reproduit dans l'encadré ci-contre) offre à Sabatier l'occasion de mettre le public de son côté et de faire pression sur le recteur.

L'article de *La Dépêche* trouve un large écho. La population industrielle, essentiellement les producteurs d'électricité, soutient l'initiative municipale et le fait savoir dans le même journal quelques jours plus tard :

Les ingénieurs et industriels électriciens de la ville et de la région ayant conservé un excellent souvenir du cours électrotechnique, professé à la Faculté des Sciences de 1902-03, ont appris avec plaisir la création d'une chaire de physique industrielle. Ils émettent les vœux suivants : 1° - que le nouvel enseignement s'adresse à leurs contremaîtres et ouvriers électriciens ; 2° - qu'il soit entièrement gratuit ; 3° - que l'assiduité des auditeurs soit subordonnée aux nécessités des divers services de leur entreprise.

Le projet est également soutenu par un Comité toulousain du sud-ouest navigable, où se retrouvent élus et notables, notamment Paul Feuga (futur maire et sénateur), l'éditeur Édouard Privat, et Pierre Juppont, ingénieur et membre fondateur de la Société internationale des électriciens.

Face au peu d'empressement du recteur, Bedouce lui adresse une lettre publiée le 30 juillet par *La Dépêche*, réexpliquant le projet en insistant sur l'effet très favorable qu'aurait le nouvel enseignement sur l'implantation de nouvelles entreprises et sur la qualification et l'emploi des « enfants du peuple », comme à Lille et à Grenoble. Au conseil municipal du 10 septembre, le rapporteur de la commission de l'enseignement appuie la proposition du maire :

La création d'un enseignement municipal d'électrotechnique a été très favorablement accueilli par la population ouvrière tout entière de notre région et

suyant l'expression de *La Dépêche* (23 juillet) a même passionné le public qui, toujours d'après le même organe (30 juillet) est unanime à désirer vivement cet enseignement. [...] Il nous paraît très important que cet enseignement, si nécessaire dans notre pays, et si urgent pour donner un débouché nouveau à l'activité de nos jeunes ouvriers, ne soit point retardé. [...] Je conclus donc, en invitant le Maire à demander au ministre de l'Instruction publique la création d'une chaire municipale d'électricité industrielle à Toulouse, avec cours publics du soir et travaux pratiques pour l'enseignement des jeunes ouvriers²⁷.

Le maire renchérit, se faisant pressant :

J'ai l'espoir que le Recteur se hâtera de réparer le retard qu'il a apporté jusqu'ici. Si, contre notre attente, il ne le faisait pas, nous nous verrions obligés de nous adresser au Ministre.

Perroud, proche de la retraite, comprend qu'il va devoir céder. Il tente de sauver la face en présentant le projet municipal comme orienté vers « la grande vulgarisation populaire », et donc distinct et complémentaire du cours universitaire de Bouasse²⁸. Il prétend aussi que s'il avait, en 1903, retiré le cours à Camichel, c'était à la demande de celui-ci, qui désirait retrouver du temps pour ses travaux personnels. Dans le même temps, le cours de Bouasse est désavoué par le conseil de la faculté au motif d'une question de droits d'inscription : le doyen se refuse en effet « à appeler conférences une séance de travaux pratiques » et déclare qu'en conséquence les étudiants devront désormais s'acquitter des droits réglementaires correspondants. Bouasse se récrie :

« La faculté veut-elle que ce cours ait des auditeurs ou n'en ait point ? Imposer un droit de 50 francs revient en fait à vider le cours !²⁹ » Mais le conseil de la faculté, répondant au vœu du doyen, tient bon et vote l'exigence des droits. Bouasse annonce bientôt au recteur sa démission de ce cours³⁰.

²⁷ *Bulletin municipal* n° 11, sept. 1906, p. 205-206.

²⁸ Conseil de l'université du 30 nov. 1906.

²⁹ Procès-verbal de la séance du 29 nov. 1906 du conseil de la faculté.

³⁰ Séance du 23 mai 1907 du conseil de l'université.

**Article de *La Dépêche*, publié le 22 juillet 1906,
relatant un entretien avec Paul Sabatier**

Ainsi qu'on l'a vu hier, par la lettre de M. Paul Sabatier, le Conseil de la Faculté a émis un avis favorable à la création dans notre ville d'une chaire d'électricité industrielle. J'ai cru qu'il serait intéressant pour les lecteurs de *La Dépêche* d'avoir sur cette question des renseignements plus détaillés et j'ai demandé un entretien à M. Sabatier qui a bien voulu, le plus gracieusement du monde, se mettre à ma disposition.

Le Doyen de notre Faculté des sciences est un homme dans toute la vigueur de l'âge, alerte, vif, nerveux. [...] Dans la conversation, M. Sabatier crispe et retousse sa lèvre supérieure et découvre, à la façon des félins, l'émail de ses dents, mais ce léger tic, qui chez un autre annoncerait une morsure, n'enlève rien chez lui à la grâce du sourire. Du reste, M. Sabatier est toujours d'une séduisante urbanité.

Je n'ai pas à dire ici quel savant éminent est le doyen de la Faculté des sciences de Toulouse. Je me bornerai à rappeler que ses travaux et ses découvertes sur la synthèse des pétroles ont fait connaître son nom dans le monde entier.

« La municipalité, m'a-t-il dit, veut créer une chaire d'électricité industrielle analogue à celle de Lille et de Grenoble. Cette idée a paru heureuse à tous ceux qui, voilà deux ou trois ans, suivaient le cours public de M. Camichel. [...] Voilà donc M. Camichel qui ouvre ici, comme il l'avait fait à Lille, un cours public d'électricité industrielle. La vogue en fût énorme. Il fallait arriver une heure à l'avance si on voulait avoir une place. Bien des gens restaient à la porte, l'amphithéâtre étant trop petit. Cependant, ce cours dut cesser.

— Pourquoi ?

— Il dut cesser à la suite d'incidents qu'il serait délicat de préciser.

— Mais encore...

— Non, je vous prie de ne pas me pousser davantage. »

Ouvrons une parenthèse, je me suis informé ailleurs. « M. Camichel, m'ont répondu les uns, animait ses conférences de considérations politiques un peu avancées pour le modérantisme de M. Perroud, le Recteur. » Les autres m'ont dit : « Peut-être le cours d'électricité industrielle tentait d'autres professeurs qui surent décider M. Perroud à intervenir ? » Diable, fermons vite la parenthèse. Je rends la parole à M. Sabatier.

« Quoi qu'il en soit, M. Camichel renonça son enseignement. Depuis, l'électricité industrielle ne fut plus que l'objet de conférences fermées, accessibles seulement à un très petit nombre.

— Et ces conférences étaient faites par qui ?

— Par M. Bouasse. Aujourd'hui, la science de l'électricité est plus que jamais nécessaire. Les nombreux auditeurs de M. Camichel manifestent le désir de voir se rouvrir un cours public, un cours de vulgarisation sur ces questions passionnantes. La houille blanche dont M. Camichel s'est d'ailleurs également occupé, va

jouer un rôle considérable dans notre région et déplacer à notre profit des industries métallurgiques et chimiques. Des chutes formidables sont captées. À Vicdessos, par exemple, une usine de 20 000 chevaux [15 000 kW] fonctionnera en juin prochain. La proposition de la municipalité toulousaine vient donc bien à son heure. Il est urgent, ainsi que le maire l'a dit justement quelque part, de former à Toulouse de bons ouvriers électriciens, de bons contremaîtres, pour qu'on n'aille pas recruter le personnel nécessaire aux usines des Pyrénées, soit à Lille, soit à Grenoble, soit même à l'étranger.

— Donc la municipalité vous a proposé la création d'une chaire d'électricité industrielle, qu'elle entretiendrait à frais communs avec l'État. Et par votre lettre que la Dépêche a publiée, j'ai vu que le Conseil de la Faculté a accueilli cette proposition à l'unanimité des votants. Où en est actuellement la question ?

— J'ai transmis la proposition du Maire au Recteur pour qu'il la soumette au conseil de l'Université. Or, ce conseil s'est réuni avant-hier et j'y assistais. Et à ma grande surprise, la question n'a pas été introduite par M. Perroud. Je m'en suis expliqué à la sortie avec lui. Il allègue que la forme n'a pas été observée : c'est lui, pense-t-il, qui aurait dû être saisi d'abord. À quoi il est permis de répondre que la Faculté est un corps autonome, qu'elle a le droit d'initiative, et que, si elle avait de l'argent, elle pourrait toute seule fonder la chaire. Je serais fort étonné si à la Faculté de droit on n'était pas de cet avis.

— Mais, Monsieur le Doyen, ne s'opposerait-on pas à la création de cette chaire précisément pour les mêmes raisons qui firent fermer la bouche à M. Camichel ? Ne dit-on pas, dans certains milieux, qu'on veut couper l'herbe sous les pieds de M. Bouasse ?

— En quoi, je le demande, M. Bouasse aurait-il l'herbe coupée sous les pieds ? Le titulaire de la nouvelle chaire fera, dans son cours public largement ouvert à tous, autre chose que ce que M. Bouasse fait dans son cours fermé. Et puis, il n'y aura pas trop de deux maîtres si, comme je l'espère, l'enseignement électrotechnique réussit à Toulouse.

— Mais enfin, M. Perroud tient tout en suspens.

— M. Perroud m'a dit qu'il aurait une entrevue avec le maire. Allez, tout s'aplanira.

— Et si tout ne s'aplanit pas ?

— Je ne saurais l'admettre un instant. Au surplus, le Ministre, après avoir soumis la question au Comité consultatif de l'Instruction publique, à Paris, peut créer lui-même la chaire si les fonds sont disponibles.

— Et pour le choix du titulaire ?

— Le Ministre est souverain [...] ^a. »

a. La Dépêche du 22 juill. 1906. Arch. ENSEEIHT.

Le projet qu'ont en tête Sabatier, Camichel et Bedouce, dépasse la simple création d'une chaire : il s'agit d'aller vers un institut électrotechnique (IET) comme Sabatier l'explique dans son rapport quelques semaines plus tard :

Le Conseil municipal de Toulouse, au mois de septembre dernier, a donné au maire la mission de poursuivre auprès de M. le Ministre la création d'une chaire spéciale d'électricité industrielle : nous devons nous en réjouir sans réserve. La future chaire sera sans doute à bref délai le pivot d'un Institut électrotechnique, semblable à ceux qui ont été déjà créés dans certaines Universités françaises, Lille, Nancy, etc., ainsi que dans la plupart des grandes Universités étrangères³¹.

4.2.4. De la chaire municipale à l'institut électrotechnique

Le nouveau cours ouvre au printemps 1907, conduit par Camichel. Le *Bulletin municipal* se fait l'écho du succès immédiatement rencontré :

Le cours public d'électricité industrielle, créé par le Conseil municipal, a eu un succès incontestable, dont on peut se rendre compte par le nombre considérable de personnes régulièrement inscrites à la Faculté des sciences, pour suivre les exercices pratiques et les excursions qui en sont le complément indispensable. Ces personnes sont actuellement au nombre de 278 [...].

Le nombre des auditeurs du cours public est plus considérable encore et dépasse 300, à tel point que le grand amphithéâtre de la Faculté des Sciences se trouve manifestement trop petit et que les auditeurs arrivent une heure à l'avance, c'est-à-dire dès sept heures et demie, alors que le cours ne commence qu'à huit heures et demie. [...]

Dans le projet primitif, le cours ne comprenait qu'une leçon par semaine ; il s'est rapidement développé et, indépendamment de la leçon du jeudi, le professeur chargé de cet enseignement fait, chaque dimanche

³¹ P. Sabatier, doyen de la faculté des sciences, *Rapp. UT 1905-1906*, p. 211.

matin, une conférence pratique dans laquelle il explique l'excursion prochaine et où il développe certains points laissés de côté par les cours du jeudi. Cette conférence dure une heure au moins et assez souvent deux heures.

Après cette conférence, commencent les visites d'usines avec explications devant les machines, tableaux de distribution, mise en marche des moteurs, etc., ce qui fait au minimum trois heures de cours tous les dimanches³².

Ce premier succès renforce les partisans d'un institut électrotechnique qui formerait des conducteurs de travaux et des ingénieurs. Le *Bulletin municipal* précité en expose le projet et conclut :

Il n'est pas nécessaire d'insister sur les avantages de cette institution, qui porterait le nom d'institut Électrotechnique Municipal, ou tout autre désignation rappelant la collaboration de la Ville de Toulouse et de l'Université.

La ville, allant bien au-delà de son engagement initial de 1000 francs annuels, financerait intégralement la nouvelle chaire et mettrait à disposition des locaux pour les travaux pratiques, pour une salle de dessin et pour un musée industriel d'exposition permanente du matériel prêté par l'industrie.

L'opération avance désormais rapidement : le projet de convention entre la Ville et l'université est approuvé le 14 juin 1907 par le conseil d'université puis le 5 juillet par le conseil municipal³³. Camichel est nommé titulaire de la chaire d'électricité industrielle à compter du 1^{er} novembre 1907 (il était professeur adjoint depuis

³² « Voici la liste des premières usines visitées, poursuit le *Bulletin* : usine municipale de Bourrassol ; station de secours de la Société toulousaine ; installation électrique de la manufacture des tabacs ; usine hydroélectrique du Bazacle ; station d'accumulateurs de la rue Saint-Antoine-du-T ; station d'accumulateurs de la rue Peyras ; installation triphasée de la poudrière ; tramways électriques, usines Pons ; transport de force des feronneries du Midi ; station génératrice monophasée du gaz ; postes de transformateurs du théâtre du Capitole. » Rapport présenté lors de la séance du 8 mai 1907 du conseil municipal, publié dans le *Bulletin municipal* n° 11, 31 mai 1907, p. 142.

³³ *Bulletin municipal* n° 14, 31 juil. 1907, p. 211.

janvier 1904) ; l'emploi de chef de travaux associé à la chaire est attribué à Léon Jouane, antérieurement préparateur de physique à la faculté. Le diplôme d'ingénieur électricien et le brevet de conducteur électricien sont créés par le conseil d'université du 8 novembre, et approuvés par le ministère dans les mois suivants³⁴. Conformément aux usages alors en vigueur, aucun titre ni grade n'est requis pour être admis à suivre les enseignements.

La convention définitive de création de l'institut électrotechnique est adoptée le 1^{er} octobre 1908 par le conseil municipal³⁵. Elle prévoit notamment :

- la création de deux emplois : une chaire d'électricité industrielle (fondation de la Ville de Toulouse), et un emploi de chef des travaux pratiques ;
- l'installation de l'institut dans des locaux municipaux cédés à l'université ;
- des enseignements préparant au brevet de conducteur électricien (en deux années) et au diplôme d'ingénieur électricien (en trois années) ;
- le financement par la Ville des traitements de la chaire (6 000 francs) et de l'emploi de chef de travaux (3 000 francs), moyennant une réduction 20 000 à 15 000 francs de la subvention annuelle à l'université.

Un bureau de contrôle et d'essais électrotechniques est annexé à l'institut, pour des prestations à l'industrie dont les tarifs sont homologués par le ministère. En 1910, l'institut est doté d'un conseil de perfectionnement notamment chargé de la définition des programmes d'enseignement. Ce conseil comprend :

- le recteur de l'académie, président ;
- le doyen de la faculté des sciences, vice-président ;
- le directeur de l'institut, secrétaire ;
- le président du conseil général de la Haute-Garonne ;
- le maire de Toulouse et l'adjoint chargé de l'instruction publique ;
- le président de la chambre de commerce et trois directeurs d'entreprises (la Société pyrénéenne d'électricité, la Société toulousaine d'électricité, la poudrerie) ;

³⁴ Arrêtés du 21 janv. 1908 et du 29 juin 1908 approuvant la délibération du 8 nov. 1907 du conseil de l'université. Arch. ENSEEIHT.

³⁵ Arch. ENSEEIHT. La convention est reproduite en annexe.

- quatre ingénieurs (Banoulet, des postes et télégraphes, Eydoux, des ponts et chaussées, Lemoine, des manufactures de l'État, Larroze, électricien) ;
- trois professeurs à la faculté des sciences (Drach, Giran, Buhl)³⁶.

L'emplacement de l'institut est décidé par Camichel, dans des conditions qu'il racontera plus tard lors de sa réception à l'Académie des sciences :

La Ville de Toulouse me confia les clés de divers locaux vacants, et j'entrepris tout seul une promenade, je dirais presque un pèlerinage pour fixer l'endroit où s'élèverait plus tard l'Institut Électrotechnique. [...] J'arrivais, enfin, à la rue Caraman [actuelle rue Sylvain Dauriac], et mon choix se fixa sur une salle de cette rue. Je vis alors tout le parti que l'on pouvait tirer de cet emplacement : à ce moment-là, le boulevard Riquet, dans cette région de Toulouse, n'existait pas, les bâtiments situés à l'extrémité de la rue Caraman aboutissaient au chemin de halage du canal du Midi ; la rue d'Aubuisson, partant du square Rolland, s'arrêtait à la rue Riquet sans se prolonger par la rue des Écoles [actuelle rue Charles Camichel] qui n'avait pas encore été percée. Il y avait, là, un vaste espace susceptible d'être utilisé.

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 avons besoin d'eau pour les machines et les expériences. Ce fut ensuite la construction d'un amphithéâtre, l'aménagement de la salle des machines et des laboratoires d'enseignement ; plus tard, les laboratoires de recherches, nos grands réservoirs, la tour, sorte de grande éprouvette, qui s'élevèrent un jour en plein Toulouse, réalisation concrète d'une idée que j'avais longtemps envisagée, celles des expériences régulières³⁷.

³⁶ P. Sabatier, *Rapp. UT 1909-1910*.

³⁷ Réponse de M. Charles Camichel aux discours en son honneur lors de sa réception à l'Institut, *in* (Association Amicale des Ingénieurs Anciens Élèves de l'IETMA de Toulouse, 1936, p. 59-62).

Camichel évoque ensuite les débuts de l'institut, les premiers travaux pratiques et l'installation des laboratoires :

Les débuts de l'Institut Électrotechnique furent pénibles. Nous n'avions pas de ressources ; la ville de Toulouse avait mis à notre disposition une salle, nous en fîmes sans hésiter une salle des machines. Cela montre bien le sens dans lequel nous voulions organiser l'institut. 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 faisons nous-mêmes toutes les manipulations. C'était un spectacle étrange de voir les manipulations effectuées par nous-mêmes avec M. Loin, directeur de la Manufacture des tabacs, M. Dreyfus, ingénieur des poudres et salpêtres, et toute une série d'officiers d'artillerie, et d'anciens élèves de l'École Polytechnique parmi lesquels, hélas ! beaucoup furent tués à la guerre ; c'était un public d'élite.

Je tiens à signaler un détail touchant. C'est le dévouement des ouvriers qui, après leur journée de travail, venaient gratuitement nous aider à installer nos laboratoires naissants. Je me rappelle leurs noms.

Ce que l'institut doit à Bedouce est rappelé :

L'Institut Électrotechnique est une fondation de la ville. C'est son titre officiel. Comme maire de Toulouse, M. Bedouce a été l'instigateur de la création des divers services de cet Établissement et, depuis le début, depuis 1907, il n'a jamais cessé de s'intéresser à son développement. On retrouve dans chaque circonstance importante son influence bienfaisante.

Les industriels de l'électricité, quant à eux, ont accompagné le projet avec bienveillance mais sans réel engagement ; leur rôle est resté mineur. La Compagnie des chemins de fer du Midi ne fera appel à Camichel qu'à partir de 1910, lorsque se développera l'hydroélectricité pour la traction électrique³⁸.

³⁸ Camichel (1929, p. 9).

4.2.5. Henri Bouasse

Henri Bouasse, professeur de physique à la faculté des sciences, est apparu ci-dessus comme un vigoureux adversaire de Camichel. Sa personnalité hors normes et son œuvre pédagogique et scientifique méritent ici quelques lignes³⁹. Né à Paris en 1866, Bouasse entre à l'École normale supérieure en 1885. Il obtient l'agrégation de sciences physiques en 1888, classé premier, puis passe trois ans au Collège de France comme préparateur auprès d'Éleuthère Mascart. Après un bref passage au lycée d'Agen, il est nommé en novembre 1892 maître de conférences à la faculté des sciences de Toulouse. Le mois suivant, il soutient une thèse de mathématiques : *Réflexion et réfraction dans les milieux isotropes, transparents et absorbants*. Il se tourne ensuite vers la théorie de l'élasticité et les phénomènes à hystérésis, et soutient en janvier 1897 une seconde thèse, de physique cette fois : *Sur la torsion des fils fins*. La même année, il obtient la chaire de physique de l'université de Toulouse où il restera jusqu'à sa retraite en 1937.

Grand érudit doué d'une puissance de travail peu commune, il publie de nombreux ouvrages pédagogiques : un *Cours de physique* en six volumes (1908-1910) pour la licence et l'agrégation de physique, un *Cours de mathématiques générales* (1911), un *Cours de mécanique rationnelle et expérimentale* (1910), et enfin les 45 volumes de la collection *La Bibliothèque scientifique de l'ingénieur et du physicien* (1911-1932), ouvrages tous publiés par Delagrave à Paris. Cette œuvre achevée, Bouasse entreprend des recherches originales en mécanique des fluides, notamment sur les jets d'air turbulents, les nappes liquides, la formation des rides et des ondes, et la stabilité des trombes. Il publie entre 1932 et 1939 onze mémoires substantiels dont trois dans les *Publications Scientifiques et Techniques du ministère de l'Air*⁴⁰. Bouasse travaille jusque dans ses dernières

³⁹ Fert (1954) ; Locqueneux (2005) ; G. F. Herrenden Harker 1962 *Henri Bouasse : the man, his work*, préface de « H. Bouasse, *Compléments de dynamique des fluides et d'acoustique : œuvres inédites*. t. 1, Blanchard, Paris ».

⁴⁰ H. Bouasse, Modification par les obstacles des jets d'air turbulents, *Annales de physique (AP)*, 1933. Tourbillons donnés par les jets de petite vitesse, *Publications Scientifiques et Techniques*

années dans le laboratoire que l'université lui a laissé. Il meurt à Toulouse en 1953.

La personnalité batailleuse de Bouasse se manifeste notamment dans les fameuses préfaces de sa *Bibliothèque scientifique*. Irrité d'avoir été écarté de l'enseignement de l'électricité industrielle, en 1905, au profit de Camichel, sa verve ravageuse y fustige régulièrement « l'Institut Idiotechnique » ou « Electrocomique »⁴¹. On ne peut pour autant réduire Bouasse à un défenseur obtus de la « science pure » ignorant des applications ou opposé à leur enseignement à l'université. Comme l'annonce l'exorde de sa *Bibliothèque*, il s'agit pour lui de faire « Beaucoup de Science, mais en vue des Applications ! » Son esprit curieux et encyclopédique s'intéresse de près aux techniques et procédés de fabrication, auxquelles il consacre de nombreuses pages, car « Le vice de l'enseignement actuel est l'ignorance ou le mépris des choses concrètes », et « La Science n'a vraiment de pouvoir éducatif qu'à la condition d'entrer dans le détail. » Pierre Duhem salue son talent :

La sûreté avec laquelle M. Bouasse sait simplifier chacun des problèmes pratiques qu'il traite jusqu'au degré voulu et jusqu'à ce degré-là seulement, est peut-être la qualité la plus rare dont il fasse preuve.

Au-delà de leur ton polémique, les critiques de Bouasse portent non sur l'enseignement des applications, mais sur le risque que celui-ci se réduise à des aide-mémoire et affaiblisse l'éducation générale de son lecteur : « C'est toujours la base qui manque. J'estime qu'il faut commencer par le commencement et le savoir imperturbablement ». Ses critiques portent également sur le caractère abstrait et trop théorique de l'enseignement, et sur le peu

du ministère de l'Air (PSTMA), 1933. Quantités de mouvement des jets gazeux turbulents, Annales de la faculté des sciences de Toulouse (AFST), 1933. Phénomènes dans les fluides tournants, PSTMA, 1935. Singularités des nappes liquides, AP, 1936. Étude cinématique des nappes et couches liquides, AFST, 1936. Rides et ondes immobiles, AP, 1937. Formation des ondes et des rides ; entraînement par l'eau en mouvement, AFST, 1937. Diffraction des ondes capillaires. Ondes enveloppes, AP, 1939. Stabilité des entonnoirs et des trombes, PSTMA, 1939.

⁴¹ Voir la préface intitulée « Soviets universitaires » du tome *Jets, tubes et canaux*.

de place accordé à l'expérimentation, défauts par ailleurs souvent dénoncés par ses contemporains (Belhoste & Chatzis, 1998). À cet égard, sa réflexion est proche de celle de Camichel.

L'autorité des ouvrages de Bouasse tient à sa vaste culture scientifique et à l'originalité de sa réflexion, acquise à travers ses expériences propres dans son laboratoire ou des sources de première main :

On s'accorde à trouver mes livres « vivants ». Voici mon secret : je ne prends rien dans les ouvrages de seconde main : je lis et relis les mémoires originaux. Celui qui découvre un fait a toujours une vision concrète, ingénue, qui ne se retrouve pas dans la suite.

Bouasse éprouve une admiration particulière pour les physiciens anglais :

J'aime leur tournure d'esprit : parmi les livres que je consulte le plus souvent sont les « Scientific papers » de Stokes, Faraday, Kelvin, Rayleigh, sans parler d'une foule d'autres. Le génie n'est pas chose commune : quand je le rencontre je sais m'incliner.

Travailleur solitaire, ami de Pierre Duhem, politiquement conservateur, Bouasse demeurera un homme tourné vers le XIX^e siècle, qui refusera la révolution de la physique quantique. Mais, défend le physicien Pierre-Gilles de Gennes, « il a construit, avec enthousiasme, des mises au point durables sur la physique classique⁴². »

4.3. De l'électrotechnique à la mécanique appliquée

La première décennie de l'IET est marquée par un essor remarquable de sa population étudiante, d'une part, et par une nette inflexion vers la mécanique appliquée d'autre part, inflexion liée au développement de l'hydroélectricité pyrénéenne.

⁴² P.-G. de Gennes, F. Brochard-Wyart & D. Quéré, *Gouttes, bulles, perles et ondes*, Belin (2002), p. 9.

4.3.1. Essor initial

Population étudiante. Le succès auprès des étudiants se manifeste dès 1908-1909, première année de fonctionnement plein. Dans son rapport annuel, le doyen de la faculté s'en félicite :

L'institut électrotechnique dont nous annonçons l'année dernière la création définitive a dépassé toutes les espérances. Les vastes locaux qui avaient été aménagés rue Caraman sont devenus absolument insuffisants pour recevoir les 180 étudiants inscrits dans les trois années, et la nécessité d'aménager de nouvelles salles pour les cours et les travaux pratiques s'est imposée sans réserve. Les ressources pécuniaires que procurent à l'Institut les droits de laboratoires versés par les élèves permettront, avec le concours généreux de l'Université, d'atteindre ce résultat⁴³.

Cette année-là, Camichel compte 152 étudiants dans la formation d'ingénieur électricien et 28 dans la formation de conducteurs électriciens. Sur les 152 élèves ingénieurs, 85 sont étrangers : 69 Russes, 8 Italiens, 3 Espagnols, 1 Allemand, 1 Roumain, 1 Argentin, 1 Chilien et 1 Haïtien⁴⁴. Cette forte proportion d'étudiants étrangers – plus de la moitié –, majoritairement issus de l'Empire russe, se maintiendra pendant une dizaine d'années⁴⁵. On compte en revanche très peu d'étudiantes : une seule en 1908-1909, une seule encore l'année suivante. La faculté des sciences elle-même en compte encore peu – 17 femmes pour 637 hommes, dont 8 françaises et 9 étrangères – mais la population féminine amorçe alors son ascension ainsi que le note un rapport du conseil de l'université :

Les étudiantes, autrefois si rares dans les Facultés, deviennent chaque année plus nombreuses. Le nombre

⁴³ P. Sabatier, *Rapp. UT 1908-1909*, p. 95.

⁴⁴ J. Tapie, *Rapp. UT 1908-1909*, p. 23-24. Le nombre total d'étudiants étrangers, à l'université de Toulouse est de 130, dont 104 à la faculté des sciences.

⁴⁵ Parmi les étudiants de la promotion 1913, figure Valérien Dovgolevsky (1885-1934), né en Ukraine, futur ministre de l'URSS et ambassadeur à Paris ; décédé en 1934, le *Bulletin municipal* du mois de juillet lui consacre un long article.

de nos étudiantes inscrites ou immatriculées s'est élevé cette année à 102 [sur un total de 2877], dont 25 étrangères et 77 Françaises. [...] Elles se sont groupées récemment en une Association d'étudiantes à laquelle un local a été concédé par l'Université dans les bâtiments du grand Séminaire⁴⁶.

Les diplômés se placent sans difficulté dans l'industrie comme s'en réjouit Camichel :

Les anciens élèves [de l'IET] se placent très facilement dans l'industrie et la valeur du diplôme qu'il délivre est mis en évidence par le fait que chaque année nous comptons parmi nos élèves un certain nombre d'ingénieurs sortis des grandes écoles du gouvernement : Polytechnique, Centrale, etc. ; c'est ainsi qu'en 1912-1913, nous avons 3 candidats au diplôme d'ingénieur électricien de l'Université de Toulouse possédant déjà le diplôme de l'École polytechnique⁴⁷.

En 1913-1914, le nombre d'étudiants de la faculté des sciences est de 1051 – dépassant pour la première fois le millier) – dont 597 sont inscrits à l'IET⁴⁸. La sélection est pourtant sévère : seulement la moitié des étudiants sont admis à passer dans l'année supérieure, seulement 63 des 105 inscrits en troisième année sont diplômés ingénieurs, et 10 des 28 candidats obtiennent le brevet de conducteur.

C'est la preuve, explique Camichel, de la sévérité des examens et par voie de conséquence de la valeur du diplôme d'ingénieur de l'Institut Électrotechnique de Toulouse. Mais cette sévérité est le gage de notre prospérité [...]. Les ingénieurs diplômés de Toulouse sont extrêmement recherchés [...]. Et nous avons plus de places offertes que de candidats. Nous avons

⁴⁶ A. Prunet, *Rapp. UT 1909-1910*, p. 18. Le rapport annuel fournit à partir de cette année-là des statistiques complètes sur le nombre d'étudiantes dans les facultés et instituts – elles ne sont auparavant mentionnées que ponctuellement pour leur réussite aux concours ou pour l'attribution de mentions, prix ou médailles. Sur l'histoire des femmes à l'université de Toulouse, voir Lacoue-Labarthe (2020).

⁴⁷ C. Camichel, *Rapp. UT 1911-1912*, p. 119.

⁴⁸ P. Sabatier, *Rapp. UT 1913-1914*.

récemment revu des élèves sortis depuis deux ans à peine et qui gagnent de 12 000 à 15 000 francs par an, plus par suite que leurs Maîtres de conférences. On comprend après cela les difficultés que nous rencontrons pour recruter nos assistants⁴⁹.

Les rapports annuels du conseil de l'université ne tarissent pas d'éloges sur Camichel, son « activité inlassable » et son « talent incontesté ». Le rapporteur pour l'année 1911-1912, professeur à la faculté de droit, peut ainsi affirmer : « Le trait saillant de notre vie universitaire, ces dernières années, est certainement le magnifique succès de l'Institut électrotechnique⁵⁰. »

Personnels. L'afflux d'étudiants entraîne la création par l'université de deux nouveaux emplois en 1909 – un préparateur (M. Arlaud) et un mécanicien – auxquels s'ajoutent l'année suivante un second préparateur (M. Lautré) et un second mécanicien⁵¹. Au cours de l'année 1913-1914, l'emploi de chef des travaux occupé par Léon Jouane est transformé en maîtrise de conférences d'électrotechnique pratique, et un emploi d'« ingénieur de l'institut » (M. Espagnol) est créé par l'université afin d'améliorer « la surveillance et la direction du travail des étudiants chaque jour plus nombreux »⁵². L'institut compte alors vingt-trois personnels enseignants, appartenant à la faculté des sciences, à la faculté de droit, ou ingénieurs de l'industrie.

Développement de la mécanique. Les enseignements de mécanique se développent en liaison avec les emplois offerts, notamment par l'industrie hydroélectrique considérée comme le fer de lance du développement

⁴⁹ C. Camichel, *Rapp. UT* 1918-1919, p. 126.

⁵⁰ A. Mestre, *Rapp. UT* 1911-1912, p. 14.

⁵¹ P. Sabatier, doyen, *Rapp. UT* 1908-1909 et 1909-1910 ; assemblée de la faculté du 6 janv. 1909 ; arrêté ministériel du 16 févr. et lettre du ministre du 12 août 1909. Arch. ENSEEIHT. Le traitement annuel du mécanicien est de 1500 francs.

⁵² Séance du 12 nov. 1913 de l'assemblée de la faculté ; arrêté ministériel du 19 janv. 1914. Arch. ENSEEIHT ; le traitement annuel de l'ingénieur est fixé à 5 000 francs, celui du maître de conférences à 4 500 francs.

économique régional. Des études d'hydraulique sont entreprises à l'instigation de la Compagnie des chemins de fer du Midi (cf. chap. 5). Cette inflexion conduit à la création, en 1913, d'une quatrième année de formation portant le titre de section spéciale de mécanique appliquée, sanctionnée par un diplôme d'ingénieur mécanicien⁵³. Sont admis dans cette section spéciale les titulaires de quatre certificats d'études supérieures ainsi que les ingénieurs diplômés de l'École polytechnique, des Ponts et Chaussées, des Arts et Métiers, ou d'une université française. L'IET change alors d'appellation et devient *institut d'électrotechnique et de mécanique appliquée* (IETMA). En 1914, il diplôme 63 ingénieurs électriciens et 18 ingénieurs mécaniciens.

4.3.2. Évolution de la scolarité

Aucun diplôme n'est initialement requis pour s'inscrire à l'institut, et il n'y a pas d'examen d'entrée. Le niveau des étudiants s'en trouve très hétérogène. Pour remédier à cette situation une année préparatoire à la formation d'ingénieur-électricien est ouverte en 1909, dont le programme, généraliste, inclut mathématiques, mécanique, physique, chimie et dessin⁵⁴. Les frais d'inscriptions et d'études comprennent, classiquement, des droits trimestriels d'inscription, de bibliothèque, et de laboratoire (ces derniers sont les plus élevés). Des bourses d'études sont offertes par la municipalité et par les entreprises, notamment la Compagnie des chemins de fer du Midi.

L'affiche des jours et heures de cours pour l'année 1913-1914, présentée sur la Figure 4.2, précise les disciplines enseignées aux élèves conducteurs et élèves ingénieurs ainsi que leur rythme hebdomadaire (on notera les conférences de français pour les étudiants étrangers).

⁵³ Séances du 19 févr. 1913 de l'assemblée et du conseil de la faculté des sciences ; Arrêté du 13 mai 1913 approuvant la délibération du conseil d'université (9 mai 1913). Arch. ENSEEIHT.

⁵⁴ Arrêté du ministère de l'Instruction publique du 5 mars 1909, approuvant la délibération du Conseil de l'Université. Arch. ENSEEIHT.

PREMIER D'AFFICHER

REPUBLIQUE FRANÇAISE
UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

FACULTÉ DES SCIENCES
INSTITUT ÉLECTROTECHNIQUE

(Fondation de la Ville.)

ANNÉE SCOLAIRE 1913-1914

TABLEAU DES JOURS ET HEURES DES COURS

SUJETS DES COURS	LUNDI	MARDI	MERCREDI	JEUDI	VENDREDI	SAMEDI	NOMS DES PROFESSEURS
Calcul différentiel et intégral MECANIQUE RATIONNELLE	1 h. 14 - 2 h. 14 (1 ^{er} Année.)	1 h. 14 - 2 h. 14 (1 ^{er} Année.)	1 h. 14 - 2 h. 14 (1 ^{er} Année.)	1 h. 14 - 2 h. 14 (1 ^{er} Année.)			M. BUHL, Professeur à la Faculté des Sciences
Mathématiques Préparées aux Cours de 1 ^{er} Année.		10 h. - 11 h. (Année préparatoire.)	2 h. - 4 h. (Année préparatoire.)	10 h. - 11 h. (Année préparatoire.)			M. LATTES, Professeur à la Faculté des Sciences
Mécanique générale						2 h. - 3 h. (1 ^{er} et 2 ^{es} Année.)	M. LAMOTTE, Professeur à la Faculté des Sciences
Mécanique appliquée et Constructions						4 h. 14 - 5 h. 14 (1 ^{er} Année.)	M. EYDOUX, Ingénieur des Ponts et Chaussées, Ingénieur à la Compagnie de Midi
Résistance des Matériaux ET STATIQUE GRAPHIQUE	3 h. 12 - 4 h. 12 (2 ^{es} Année.)						M. CHATELET, Chargé de Cours à la Faculté des Sciences
Organes de Machines	6 h. 12 - 7 h. 12 (1 ^{er} et 2 ^{es} Année.)			6 h. 12 - 7 h. 12 (1 ^{er} et 2 ^{es} Année.)			M. ESPAINOL, Ingénieur électricien
Hydraulique						5 h. 12 - 6 h. 12 (1 ^{er} Année.)	M. EYDOUX, Ingénieur des Ponts et Chaussées, Ingénieur à la Compagnie de Midi
Organisation des Usines					6 h. 12 - 9 h. 12 (2 ^{es} Année.)		M. BLONDEL, Chargé de Conférences à la Faculté des Sciences
Projets de Mécanique appliquée	10 h. - 11 h. (2 ^{es} Année.)						M. SOURISSEAU, Maître de Conférences à la Faculté des Sciences
Machines thermiques	8 h. 12 - 9 h. 12 Plus (1 ^{er} et 2 ^{es} Année.)						M. LARROZE, Ingénieur électricien Ancien élève de l'École Polytechnique
Physique générale				8 h. 12 - 9 h. 12 Plus (Année préparatoire.)	9 h. 34 - 9 h. 34 Plus (Année préparatoire.)	8 h. 34 - 9 h. 34 Plus (Année préparatoire.)	M. LAMOTTE, Professeur à la Faculté des Sciences
Électricité générale		3 h. 12 - 6 h. 12 (1 ^{er} Année.)					M. JOUANE, Chef des Travaux pratiques
Électricité élémentaire				6 h. 12 - 7 h. 12 (Condensateurs.)			
Électrotechnique générale COURANTS CONTINUS						2 h. - 3 h. (1 ^{er} et 2 ^{es} Année.)	
Cours public			6 h. 12 - 7 h. 12 (Électro-motricité.)				
Électrotechnique générale COURANTS ALTERNATIFS							M. GARNICHEL, Professeur à la Faculté des Sciences
Conférence		2 h. - 3 h. (1 ^{er} et 2 ^{es} Année.)			2 h. - 3 h. (1 ^{er} et 2 ^{es} Année.)		
Électrotechnique appliquée CONSTRUCTION DE MACHINES	2 h. - 3 h. (3 ^{es} Année.)						M. LARROZE, Ingénieur électricien Ancien élève de l'École Polytechnique
Électrotechnique appliquée INSTALLATIONS ELECTRIQUES		8 h. 12 - 9 h. 12 Plus (3 ^{es} Année.)					
Construction de lignes (Dessins annexes)	5 h. 12 - 6 h. 12 (3 ^{es} Année.)					3 h. 12 - 6 h. 12 (3 ^{es} Année.)	M. BABOULET, Ingénieur des Ponts et des Télégraphes
Chimie générale	8 h. 12 - 9 h. 12 Plus (Année préparatoire.)	9 h. 12 - 9 h. 12 Plus (Année préparatoire.)	9 h. 12 - 9 h. 12 Plus (Année préparatoire.)	9 h. 12 - 9 h. 12 Plus (Année préparatoire.)			M. GIRAN, Professeur à la Faculté des Sciences
Électrochimie appliquée					5 h. - 6 h. (3 ^{es} Année.)		
Conférences de droit industriel	Destinées aux Étèves-Ingénieurs et Étèves-Conducteurs; les dates et heures seront ultérieurement indiquées						M. CÉZAR BRU, Professeur à la Faculté de Droit M. EBREN, Professeur à la Faculté de Droit M. REMAURY, Docteur en Droit, Ancien Conseiller
Conférences de Français DESTINÉES AUX ÉTUDIANTS ÉTRANGERS	4 h. 12 (Année préparatoire.)			2 h. - 4 h. (Année préparatoire.)	4 h. 14 (Année préparatoire.)		

Figure 4.2 Affiche des cours de l'IET pour l'année 1913-1914, partie haute des jours et heures de cours (Brochure de présentation de l'IET, 1914).

TRAVAUX PRATIQUES D'ÉLECTRICITÉ INDUSTRIELLE, DE MÉCANIQUE APPLIQUÉE ET DE DESSIN
 CHEF DES TRAVAUX PRATIQUES : M. JOUANNE. — INGÉNIEUR ATTACHÉ A L'INSTITUT ÉLECTROTECHNIQUE. — M. ESPAIGNOL.
 PRÉPARATEURS ET ASSISTANTS : MM LAUTRÉ, GROUSSARD, DUPIN, RUFFIÉ, DUPÉ, BERNARD

	LUNDI	MARDI	MERCREDI	JEUDI	VENDESDI	SABEDI
Elèves Ingénieurs (5 ^e Année)		8 h. — 12 h. (1 ^{re} Série.)	8 h. — 12 h. (2 ^{de} Série.)	8 h. — 12 h. (3 ^{de} Série.)	8 h. — 12 h. (4 ^{de} Série.)	8 h. — 12 h. (5 ^{de} Série.)
Elèves Ingénieurs (3 ^e Année)	8 h. — 12 h. (1 ^{re} Série.)			8 h. — 12 h. (1 ^{re} Série.)	8 h. — 12 h. (2 ^{de} Série.)	8 h. — 12 h. (3 ^{de} Série.)
Elèves Ingénieurs (2 ^e Année)	2 h. — 6 h. (1 ^{re} Série.)	8 h. — 12 h. (1 ^{re} Série.)	8 h. — 12 h. (2 ^{de} Série.)	2 h. — 6 h. (1 ^{re} Série.)	5 h. — 7 h. (2 ^{de} Série.)	
Elèves Ingénieurs (1 ^{re} Année)	8 h. — 11 h. (1 ^{re} Série.)	8 h. — 11 h. (2 ^{de} Série.)	8 h. — 11 h. (3 ^{de} Série.)	2 h. — 6 h. (1 ^{re} Série.)	8 h. — 11 h. (2 ^{de} Série.)	8 h. — 11 h. (3 ^{de} Série.)
Année préparatoire		2 h. — 4 h.		4 h. 15' — 6 h. 15'		
Elèves Conducteurs	6 h. — 8 h. (1 ^{re} Année.)	6 h. — 8 h. (2 ^{de} Année.)			6 h. — 8 h. (3 ^{de} Année.)	6 h. — 8 h. (4 ^{de} Année.)
DESSIN ET CROQUIS COTÉ						
Elèves Ingénieurs (3 ^e Année)	2 h. — 6 h. (1 ^{re} Série.)	2 h. — 7 h. (1 ^{re} Série.)	8 h. — 12 h. (2 ^{de} Série.)	2 h. — 6 h. (2 ^{de} Série.)		
Elèves Ingénieurs (1 ^{re} Année)	8 h. — 12 h. (1 ^{re} Série.)	8 h. — 12 h. (2 ^{de} Série.)		8 h. — 12 h. (3 ^{de} Série.)	8 h. — 12 h. (4 ^{de} Série.)	8 h. — 12 h. (5 ^{de} Série.)
Année préparatoire	6 h. — 7 h.			6 h. — 7 h.		
Elèves Conducteurs				6 h. — 7 h.		

Les Cours commenceront le **Lundi 3 Novembre**. Ils auront lieu à l'Institut Électrotechnique, à l'exception de ceux du Calcul différentiel et intégral, Mécanique rationnelle, Physique générale et Chimie générale, qui se feront à la Faculté des Sciences, et les Cours de français destinés aux étudiants étrangers qui auront lieu à la Faculté des Lettres.
 La Faculté délivre le Diplôme d'Ingénieur mécanicien, le Diplôme d'Ingénieur électricien et le Brevet de Conducteur électricien de l'Université de Toulouse.

Vu et approuvé :
 Le Recteur, Président du Conseil de l'Université : **Paul LAPIE.**
 Le Doyen de la Faculté des Sciences : **Paul SABATIER.**
 Le Directeur de l'Institut Électrotechnique : **C. CAMICHEL.**

Figure 4.3 Affiche des cours de l'IET pour l'année 1913-1914, partie basse des jours et heures de travaux pratiques.

La partie basse de l’affiche (Figure 4.3) donne le tableau des travaux pratiques qui occupent les élèves ingénieurs entre trois et six heures par jour, samedi compris. La scolarité comporte également, en troisième année, un stage en usine effectué pendant les vacances. L’enseignement est complété par des conférences publiques ouvrant sur des questions scientifiques d’actualité, telles que le radium, l’air liquide, la comète de Halley et l’électricité céleste, ou la navigation sous-marine. Les premières conférences de Camichel portent sur la télégraphie sans fil (dès 1907), les ions et les électrons, la fluorescence et la phosphorescence, et les lois de la résistance de l’air et l’aviation.

L’examen terminal, pour chacun des diplômes d’ingénieur, comprend un avant-projet, l’analyse d’un essai industriel, des épreuves orales, et « la présentation d’un appareil entièrement construit par le candidat

ou la soutenance d'un travail original sur une question d'électro-technique ».

La création d'un certificat d'électricité industrielle est réclamée au ministère dès 1909, mais elle ne sera acceptée qu'en 1920 lorsque la faculté accèdera à la condition préalable qu'un certificat de physique appliquée, peu attractif, soit supprimé⁵⁵ (ce certificat, conduit par Bouasse, n'est en effet délivré qu'à un seul étudiant entre 1900 et 1920).

Une association amicale des anciens élèves est créée dès 1912, dont les délégués sont invités par Camichel à prendre part aux réunions et conseils de l'institut.

4.3.3. Laboratoires d'enseignement

Agrandissements de l'institut. Dès 1908 l'IET s'étend d'année en année par la concession par la municipalité de nouveaux terrains, rue Caraman d'abord, puis le long du canal du Midi où sont édifiés de vastes bâtiments (Figures 4.4 et 4.5)⁵⁶. Des laboratoires d'enseignement sont aménagés (Figures 4.6 et 4.7), des ateliers, ainsi qu'un amphithéâtre et diverses salles spécialisées (dessin, collections, photométrie, oscillographes, accumulateurs, essais de machines « au frein », étalonnages, haute tension, etc.). Une station de télégraphie sans fil (TSF) est installée en 1913, ainsi qu'un laboratoire d'hydraulique et un laboratoire de photographie. En 1914, l'institut peut fièrement éditer une brochure de 88 pages présentant son organisation et ses laboratoires⁵⁷, illustrée de nombreuses photographies (dont quelques-unes sont reproduites sur les Figures 4.5 à 4.16), présentation résumée dans la revue *La Houille Blanche*⁵⁸.

Les laboratoires de mécanique appliquée. Camichel attache la plus grande importance aux travaux pratiques de laboratoire, qui jouent selon lui un rôle essentiel dans

⁵⁵ Séances du 6 janv. 1909 et du 8 juin 1920 de l'assemblée de la faculté des sciences ; *Rapp. UT* 1919-1920.

⁵⁶ Délibération du Conseil municipal du 5 mars 1909. Arch. ENSEEIHT pour la cession de locaux situés entre la salle des machines et les ateliers de l'École supérieure.

⁵⁷ Camichel (1914).

⁵⁸ Camichel & Eydoux (1918).

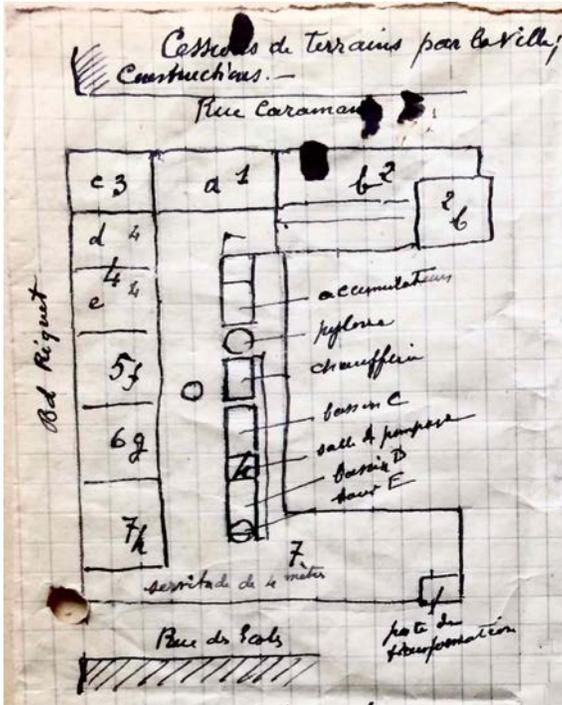


Figure 4.4 Croquis, par Camichel, des agrandissements successifs de l'IET : 1, salle des machines électriques (ex-église des Frères, 1907) ; 2, laboratoires d'enseignement (ex-école des Frères, 1907) ; 3, atelier des conducteurs (ex-grenier à grains, 1908) ; 4, entrée et amphithéâtre (ex-grenier à grains, 1909) ; 5, salle des machines (ex-école primaire supérieure, 1910) ; 6, salle des machines (ex-salle des fêtes de l'école des Frères, 1911) ; 7, pavillon de TSF et cour occupée par les laboratoires d'hydraulique (1914-1918). Arch. ENSEEIHT.

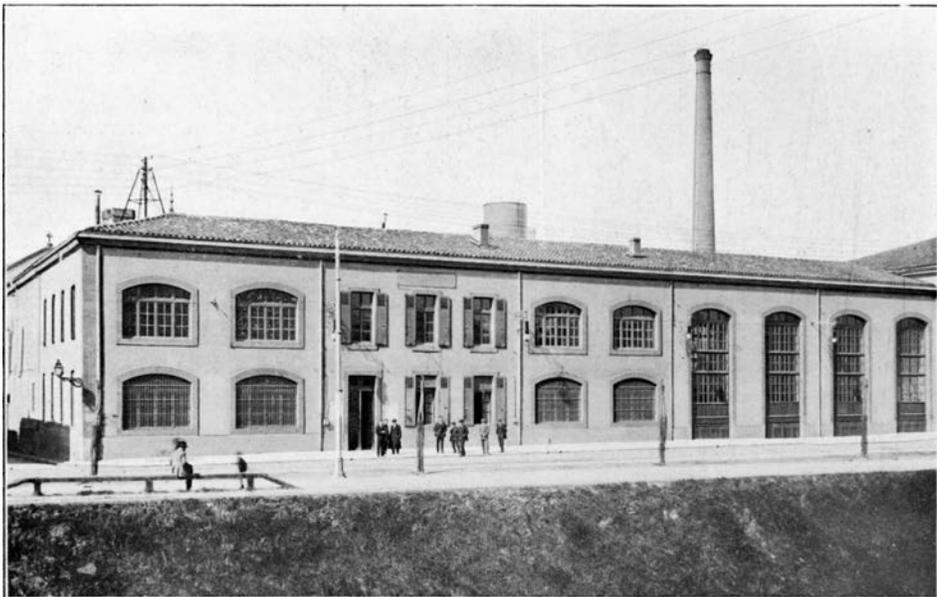


Figure 4.5 Façade de l'IET boulevard Riquet, au bord du canal du Midi (1914).



Figure 4.6 Salle des machines électriques des 2^e et 3^e années, côté génératrices : dynamos et excitatrices à courant continu, et alternateurs triphasés.



Figure 4.7 Salle des machines électriques des 2^e et 3^e années, côté réceptrices : moteurs à courant continu et à courant alternatif (asynchrones).

le succès des instituts techniques. Les étudiants doivent y être mis en contact avec de véritables machines industrielles, ainsi qu'il l'explique dans une tribune publiée en 1919 dans la *Revue générale des sciences pures et appliquées* (cf. chap. 2). Les photographies reproduites dans les Figures 4.5 à 4.16 et les caractéristiques des machines indiquées dans les légendes – des puissances de l'ordre de la centaine de kilowatts –, illustrent ces convictions.

La Figure 4.8 donne la disposition générale de ces laboratoires. Les machines proprement dites (moteur à gaz de ville, moteur Diesel, machine à vapeur, turboalternateur, turbines hydrauliques, etc.) sont installées dans une vaste salle de 280 mètres carrés au premier étage du bâtiment (Figure 4.9). Les équipements secondaires (condenseurs, pompes, tuyauteries, transformateurs, bouteilles d'air comprimé, etc.) occupent le rez-de-chaussée.

Dans la cour intérieure (Figure 4.4) se trouvent en particulier :

- la chaufferie, où est installée une chaudière vaporisant 900 kg d'eau par heure à la pression de 12 bars, un surchauffeur portant la température de la vapeur à 250 °C, et divers appareils de mesure du tirage de la cheminée ;
- une tour réfrigérante pour le circuit secondaire des machines à vapeur ;
- un gazogène à gaz pauvre ;
- un réservoir d'eau de 20 m³ au sommet d'un pylône de 20 mètres de hauteur, alimentant les turbines et ouvrages hydrauliques ;
- un canal de fuite muni de son déversoir ;
- un bassin de 80 mètres cubes.

La conduite forcée alimentant les turbines comprend l'installation d'un Venturi de mesure du débit (jusqu'à 230 l/s) et permet des essais d'ajutages.

Ces laboratoires sont équipés de nombreux instruments de mesures électriques et mécaniques (analyse des courants alternatifs, tachymètres enregistreurs, etc.), d'appareils photographiques pour l'enregistrement de courbes, et d'étalons (étalons de temps par diapason entretenu électriquement, de pression, de résistances (1 mΩ pour 1 000 A, refroidie par circulation d'eau), capacités et self-induction, étalons de photométrie, etc.). On trouve enfin un laboratoire de calorimétrie, d'analyse des combustibles et d'essais de ciments (Figures 4.16 et 4.17).

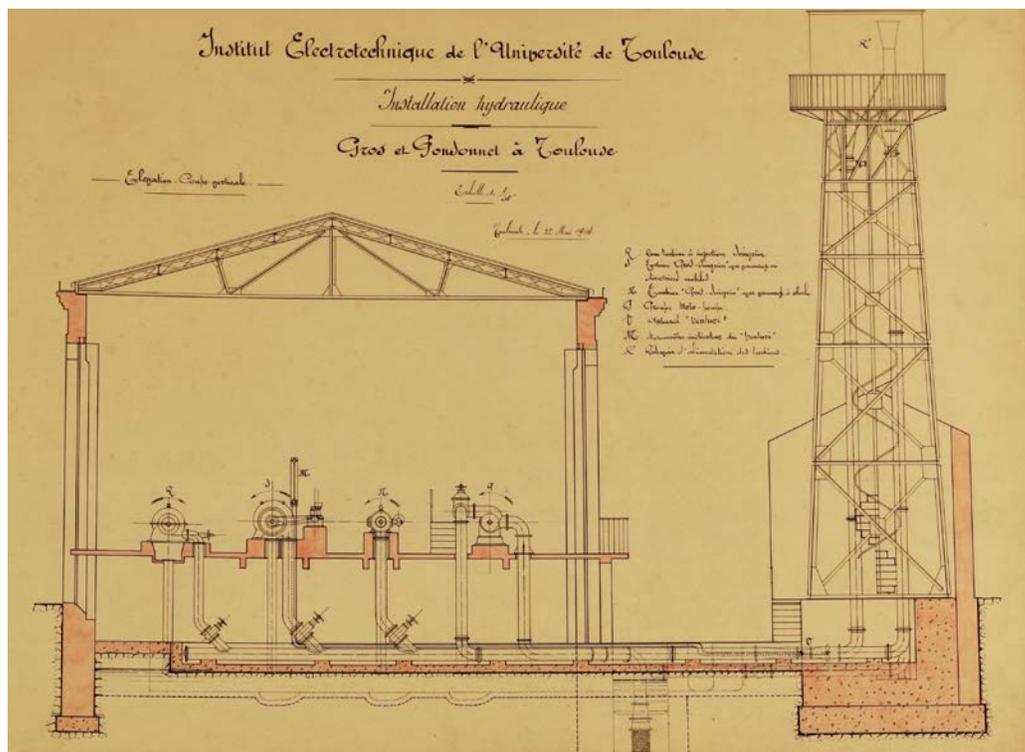
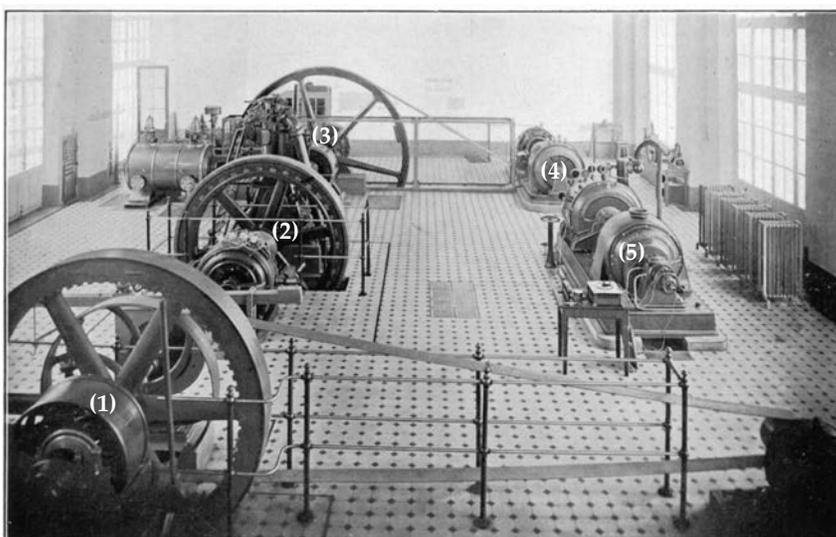


Figure 4.8 Plan en coupe, daté du 22 mai 1914, du laboratoire de mécanique appliquée et de la tour supportant le réservoir d'eau. Arch. IMFT, fonds Crausse.

Figure 4.9
Laboratoire
de mécanique
appliquée :

- (1), moteur à gaz Koerting et sa dynamo ;
- (2), moteur Diesel-Winterthur ;
- (3) machine à vapeur Pignet ;
- (4) groupe dynamo-alternateur ;
- (5), turbo-alternateur à vapeur Électra.



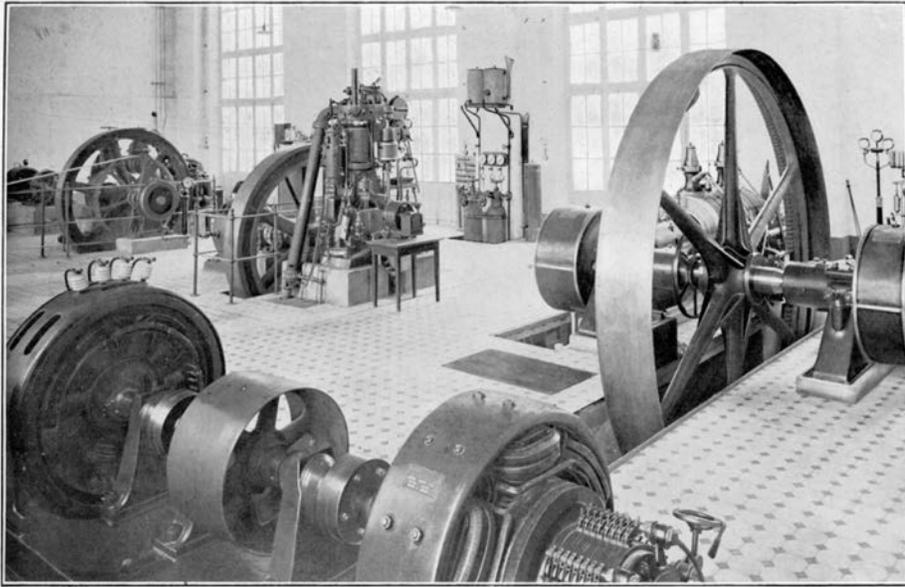


Figure 4.10 Au premier plan : groupe alternateur-dynamo (caractéristiques : 220 V, 3×197 A, 50 Hz, et 250 V, 360 A, 90 kW) ; ce groupe fonctionne de façon autonome ou est entraîné par courroie par la machine à vapeur Piguët à droite.

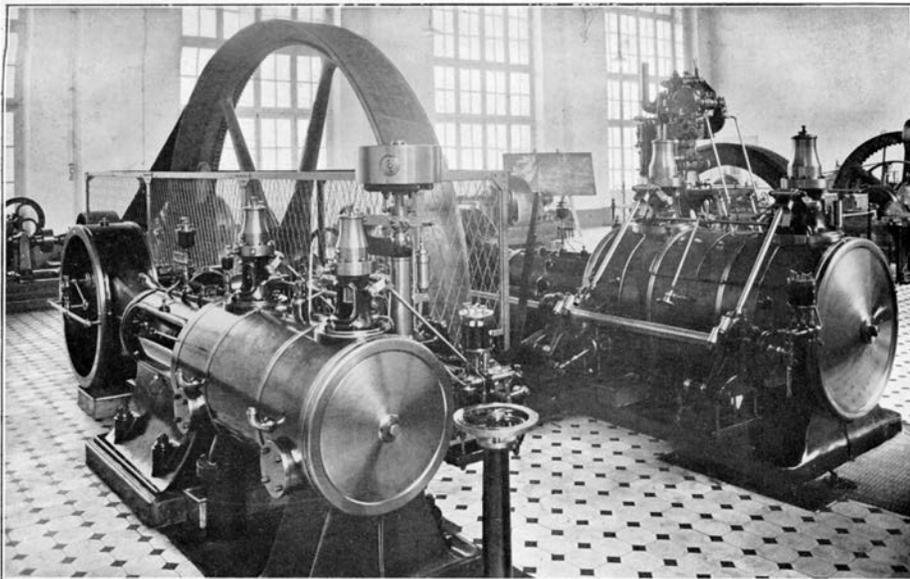


Figure 4.11 Machine à vapeur Piguët à deux cylindres (73 kW, 100 tr/min) ; la vapeur d'eau, produite par une chaudière, entre à 8 bars et 250 °C puis est condensée (en dessous de la pression atmosphérique) dans une tour réfrigérante à tirage forcé.

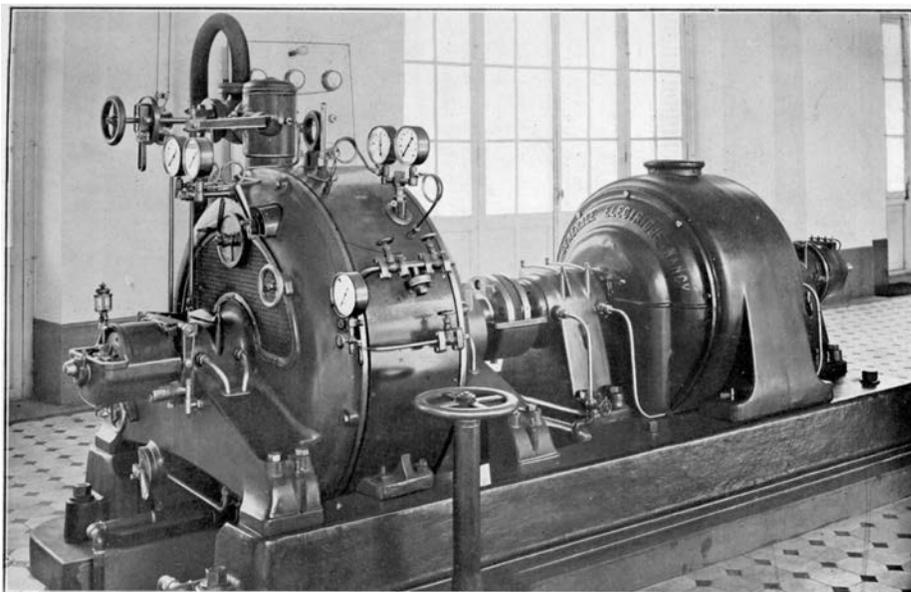


Figure 4.12 Turbo-alternateur Électra (Nancy) ; la turbine à vapeur à deux étages (7,5 bars et 240 °C à l'entrée) développe 73 kW à 3 000 tr/min, chargée par l'alternateur triphasé (200 V, 3×230 A, 50 Hz).

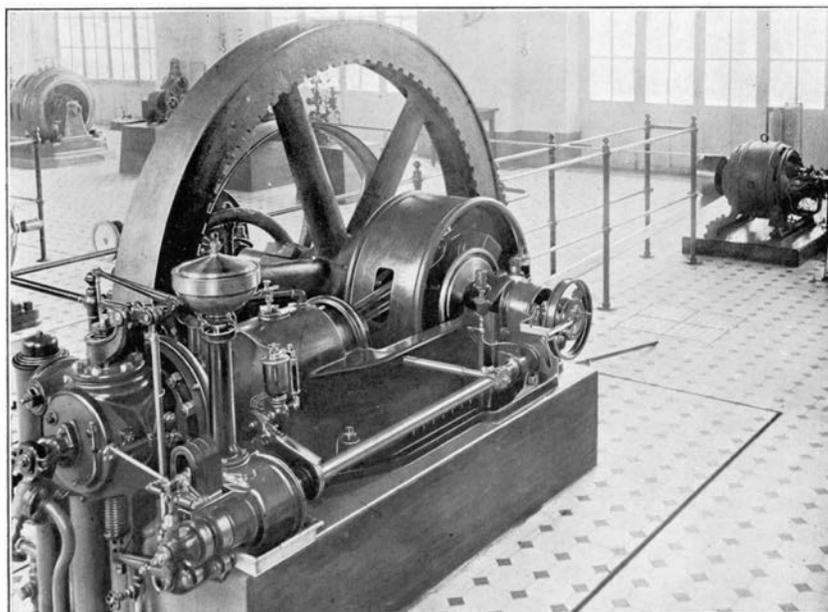


Figure 4.13 Moteur à gaz de ville Koerting à un cylindre (18 kW à 240 tr/min), chargé par une dynamo ou un frein de Prony refroidi par circulation d'eau.

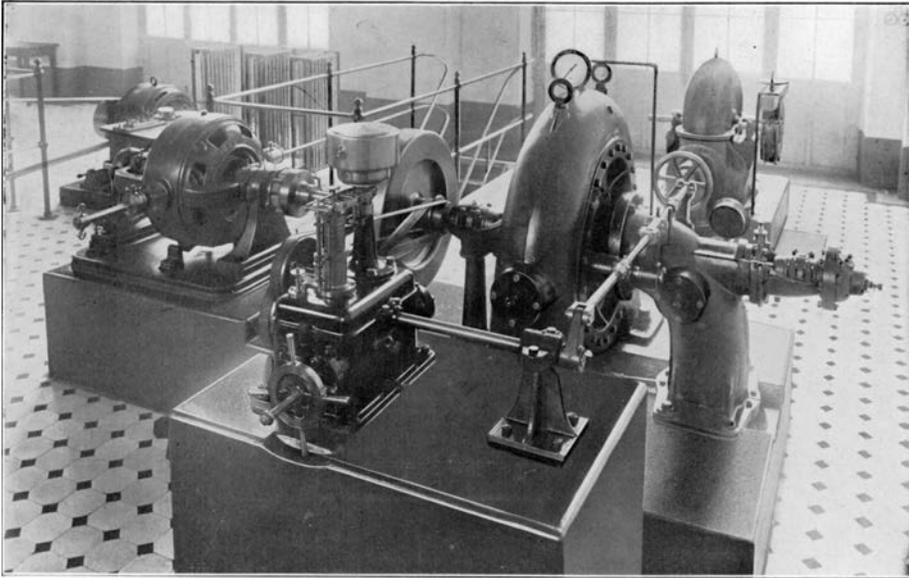


Figure 4.14 Turbine hydraulique Francis et son régulateur (chute d'eau de hauteur 17 m, 92 l/s, 12 kW), chargée par une dynamo-frein ; au fond à droite : roue Pelton (28 l/s, 3 kW) avec frein de Prony refroidi par circulation d'eau.

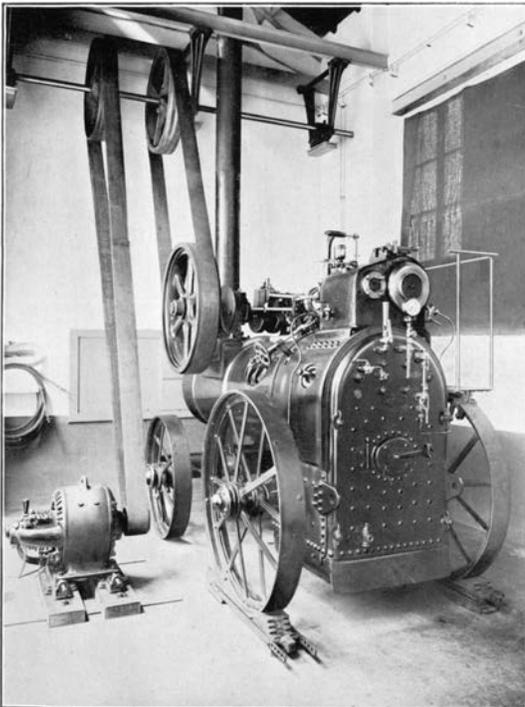


Figure 4.15 Machine à vapeur sur roues (locomobile) à un cylindre (pression de vapeur 10 bars, 15 kW à 240 tr/min), et dynamo entraînée (125 V, 100 A).

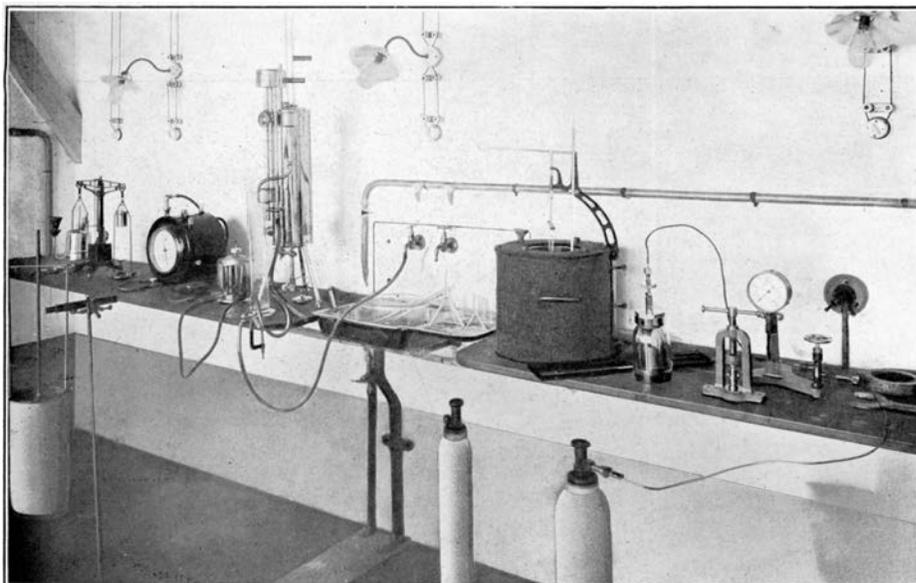


Figure 4.16 Bombe calorimétrique Malher et calorimètre de Junkers pour la détermination du pouvoir calorifique des combustibles (houille, anthracite, pétrole, huiles de goudron, gaz de ville, gaz pauvres, etc.).

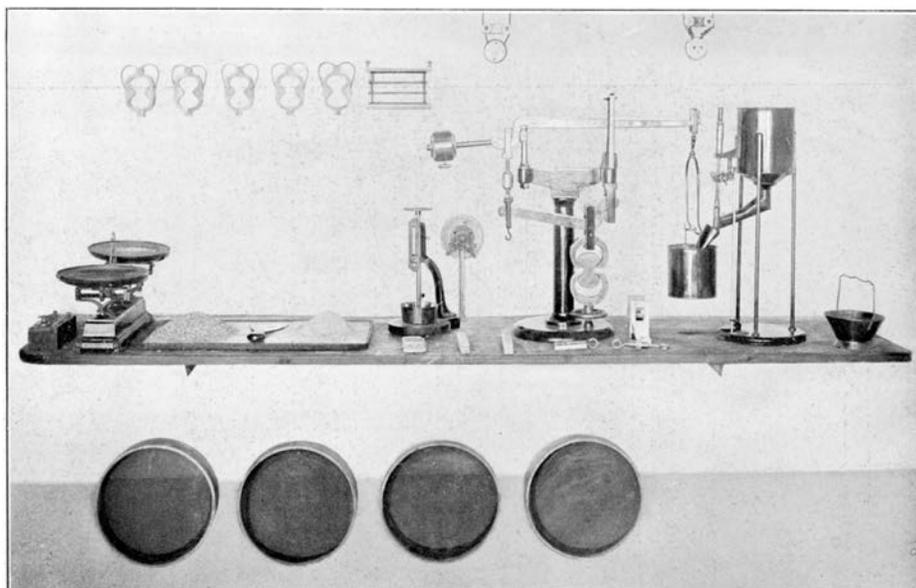


Figure 4.17 Appareils d'essais de mortiers et ciments ; d'autres appareils permettent les essais de métaux.

4.3.4. Laboratoires de recherches

Les laboratoires d'enseignement installés, l'effort porte sur l'organisation de laboratoires de recherches, avec pour objectif déclaré la préparation de thèses de doctorat.

Nous avons tenu à organiser d'abord les laboratoires d'enseignement, explique Camichel, car il est nécessaire de donner à nos élèves une instruction approfondie avant de leur permettre d'entreprendre de véritables recherches. Chaque année plusieurs de nos élèves, leurs examens passés, nous demandent à rester à l'Institut électrotechnique pour y faire des travaux personnels. Nous n'avons pu jusqu'à présent leur donner satisfaction, mais lorsque nos laboratoires d'enseignement seront complètement achevés, il conviendra de songer à l'organisation de laboratoires de recherches distincts des laboratoires d'enseignement, et de demander à l'État que l'Université de Toulouse soit autorisée à délivrer le doctorat d'université (mention électricité industrielle), les droits afférents au doctorat d'université (mention physique) étant insuffisants pour des recherches d'électrotechnique⁵⁹.

Un laboratoire d'hydraulique est ainsi créé en 1913, en liaison avec l'essor de l'hydroélectricité pyrénéenne et sous les auspices de la Société hydrotechnique de France (SHF). La Compagnie des chemins de fer du Midi, avec laquelle des relations se sont nouées dès 1910, en est le partenaire industriel privilégié. Un ingénieur de cette Compagnie, Denis Eydoux, polytechnicien, entreprend une thèse de doctorat sous la direction de Camichel, sur les coups de bélier dans les conduites – la première du laboratoire, soutenue en 1919. Le laboratoire, remarquablement équipé grâce à d'importantes subventions du ministère des Travaux publics, fait l'objet d'une présentation dans la revue de la SHF, *La Houille Blanche*, présentation co-signée par Camichel et Eydoux⁶⁰. L'activité de ce laboratoire fait l'objet du chapitre 7.

⁵⁹ C. Camichel, *Rapp. UT 1911-1912*.

⁶⁰ Camichel & Eydoux (1918).

4.4. L'IETMA entre les deux guerres

La guerre déclarée en août 1914 vide l'université de Toulouse d'une large partie de ses étudiants et de ses personnels mobilisés sous les drapeaux. L'équipe dirigeante de l'institut électrotechnique est mobilisée et Camichel lui-même se porte engagé volontaire dans l'armée active – à l'âge de quarante-trois ans. Blessé, il rentre à Toulouse l'année suivante puis, remis de ses « glorieuses blessures⁶¹ », reprend ses activités universitaires.

4.4.1. Contexte général de l'entre-deux-guerres

La paix revenue, l'université souffre d'une conjoncture économique défavorable liée à une forte inflation et au désengagement de l'État⁶². L'institut se trouve cependant relativement à l'abri de la pénurie générale du fait de larges subventions du ministère des Travaux publics et du fidèle soutien de la Ville.

Une embellie générale survient en 1926 où, après des années de « difficultés financières très graves⁶³ », les dotations de l'État augmentent et les salaires sont significativement revalorisés. L'institut connaît alors une seconde période de forte croissance, favorisée par sa transformation, en 1925, en institut d'université, nouveau statut qui lui confère une précieuse autonomie financière lui permettant de profiter pleinement de ses ressources propres (droits d'inscription et droits de laboratoire des étudiants, subventions publiques et privées).

La situation financière de l'université et de l'institut électrotechnique se dégrade à nouveau dans les années 1930, en relation avec la crise économique et une forte diminution du nombre d'étudiants. Une amélioration se dessine à la fin de la décennie, à la veille de la guerre, du fait d'une reprise de la croissance du nombre des étudiants, du relèvement de la taxe d'apprentissage, et d'importantes subventions de la Caisse nationale de la recherche scientifique (créée en 1935) pour les laboratoires de recherche⁶⁴.

⁶¹ P. Sabatier, *Rapp. UT 1914-1915*, p. 46.

⁶² Barrera & Grossetti (2020a).

⁶³ P. Sabatier, *Rapp. UT 1925-1926*, p. 50.

⁶⁴ P. Dop, *Rapp. UT 1938-1939*, p. 73-74.

4.4.2. Population étudiante et scolarité

Population étudiante. Les variations du nombre d'étudiants à la faculté des sciences et à l'institut électrotechnique, représentées sur la Figure 4.18, reflètent les évolutions notées ci-dessus. On y retrouve, avant la Première Guerre mondiale, la forte croissance de la faculté, essentiellement poussée par l'essor de son institut électrotechnique. À l'effondrement lié à la guerre, succède une deuxième période de croissance, où les effectifs de l'IET représentent encore le tiers de ceux de la faculté – les effectifs de l'institut de chimie et de l'institut agricole atteignent respectivement, en 1926 et 1927, la centaine et la trentaine.

L'arrivée à l'âge adulte des classes creuses nées pendant la guerre entraîne, à partir de la fin des années 1920, une nouvelle chute importante du nombre d'inscrits : en dix ans, celui-ci passe de 1487 à 600 à la faculté des sciences, et de 492 à 87 à l'IET. L'institut de chimie et l'institut agricole connaissent des baisses semblables⁶⁵. Un regain se manifeste à la veille de la Seconde Guerre mondiale, regain qui s'amplifie durant la guerre du fait de l'arrivée massive de réfugiés fuyant la zone occupée.

L'évolution du nombre d'ingénieurs diplômés, représenté sur la Figure 4.19, suit les mêmes alternances de croissance et décroissance, passant par un minimum au début de chacune des deux guerres et culminant à plus d'une centaine à la fin des années 1920.

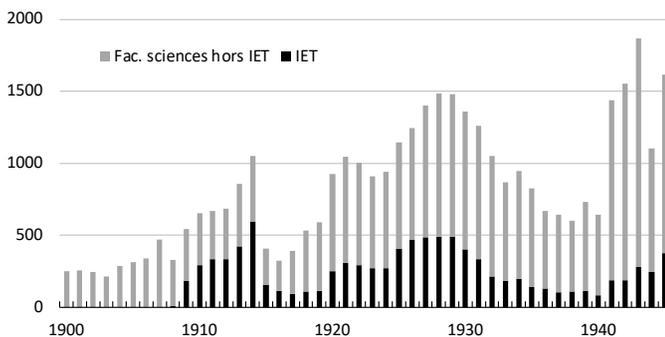
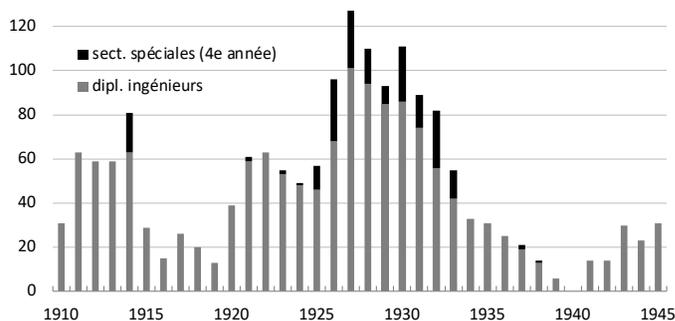


Figure 4.18 Nombre d'étudiants inscrits à l'IET et à la faculté des sciences hors IET. Source : rapports du conseil de l'université de Toulouse.

⁶⁵ Idrac (1996).

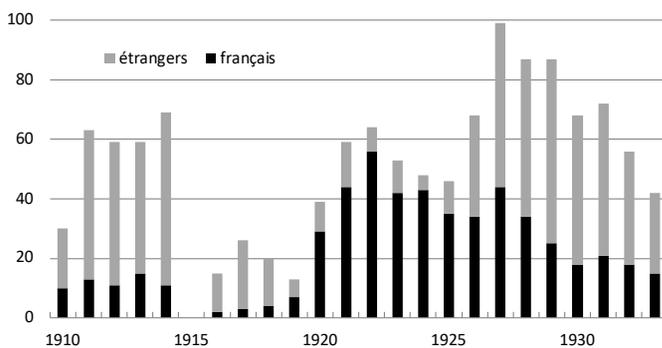
Figure 4.19 Nombre de diplômes d'ingénieur décernés (*Bulletin municipal*, 1934, p. 487 ; *Rapp. UT*).



La part des étudiantes à la faculté des sciences, restée inférieure à 5 % avant la Première Guerre mondiale, croît dans l'entre-deux-guerres d'environ 10 à 22 %. Mais très peu d'entre elles se dirigent vers l'institut électrotechnique. Celui-ci en compte seulement une ou deux dans ses effectifs, avec un maximum, en 1927-1928, de quatre pour 496 hommes⁶⁶. Ces étudiantes sont cette année-là toutes étrangères, situation assez fréquente liée au fait que de nombreux pays leur interdisent l'accès à l'université⁶⁷. Une association les fédère, comme indiqué plus haut, hébergée dans un local concédé par l'université.

Étudiants étrangers. L'attrait de l'institut électrotechnique pour les étudiants étrangers, considérable dès sa création, se confirme dans l'entre-deux-guerres. La Figure 4.20 précise l'évolution, entre 1910 et 1934, du

Figure 4.20 Nombre d'ingénieurs diplômés français et étrangers ; en 1934, l'IETMA a diplômé 1242 ingénieurs dont 708 étrangers (*Bulletin municipal*, 1934, p. 487).



⁶⁶ Lacoue-Labarthe (2020, p. 492) ; P. Sabatier, *Rapp. UT 1927-1928*, p. 65.

⁶⁷ Barrera (2020b, p. 553).

nombre d'ingénieurs diplômés français et étrangers⁶⁸. On y retrouve la prédominance de ces derniers jusqu'en 1918-1919. Il s'agit pour la plupart de Russes, parmi lesquels de nombreux juifs victimes de l'antisémitisme dans leur pays et empêchés, depuis les années 1880, de s'inscrire dans leurs universités du fait de *numerus clausus*⁶⁹.

La proportion entre français et étrangers s'inverse ensuite mais les étrangers reviennent en force à partir de 1924. Il s'agit alors essentiellement de ressortissants de pays d'Europe centrale et orientale, issus de l'élite cultivée et francophile mais aussi de juifs fuyant l'antisémitisme qui monte en Europe. En 1927-1928 où les effectifs passent par un maximum, l'IET compte 370 étrangers pour 130 français. Camichel ne précise pas leur nationalité mais la distribution peut être estimée à partir de celle que donne Sabatier pour l'ensemble de la faculté des sciences, où, sur les 835 étrangers en provenance de 36 pays, on compte notamment 243 Polonais, 137 Roumains, 115 Bulgares, 87 Russes, 55 Lithuaniens, 39 Espagnols, 23 Égyptiens, 22 Palestiniens et 20 Serbes⁷⁰.

Les étrangers à l'IET se font moins nombreux dans les années 1930 – phénomène général à l'université de Toulouse et à la France – du fait de la crise économique et de la méfiance que désormais ils inspirent. À l'institut électrotechnique, on s'insurge ainsi contre les ingénieurs étrangers qui acceptent des salaires moindres et on alerte sur le danger de confier des installations électriques à des naturalisés au loyalisme incertain⁷¹. La proportion des étrangers reste cependant relativement élevée du fait d'une baisse simultanée du nombre des Français. Pour l'année 1938-1939, les étrangers à l'IET ne sont plus que 26 pour 90 Français. La distribution des nationalités peut encore être estimée à partir de celle de la faculté des sciences, où, sur 143 étrangers, on compte notamment 26 Roumains, 25 Polonais, 19 Bulgares, 16 Palestiniens, 13 Hongrois et 11 Yougoslaves⁷². En fin de compte, sur les 708 ingénieurs diplômés entre 1910 et 1933, 534 sont de nationalité étrangère, soit plus de 75 %.

⁶⁸ *Bulletin municipal*, 1934, p. 487.

⁶⁹ Barrera (2020b, p. 552-553).

⁷⁰ P. Sabatier, *Rapp. UT 1927-1928*, p. 57.

⁷¹ Barrera (2020b, p. 556).

⁷² P. Dop, *Rapp. UT 1938-1939*, p. 18 et p. 82.

Scolarité. À partir de la rentrée scolaire 1931, la troisième année offre deux spécialisations, en électricité ou en mécanique, qui attirent respectivement trois quarts et un quart des étudiants⁷³. La section spéciale de mécanique appliquée (quatrième année) connaît quant à elle une fortune intermittente : au succès de l'année inaugurale (1914, dix-huit ingénieurs diplômés) fait suite une dizaine d'années blanches, puis un retour en grâce à la fin des années 1920 (trente-sept diplômés en 1930). Cette section disparaît en 1933 du fait de la possibilité, à partir de 1931, d'une spécialisation en mécanique dès la troisième année. Une section spéciale d'ingénieurs radioélectriciens, créée en 1935 (cf. section suivante), ne diplôme que trois ingénieurs au cours des dix premières années de son existence, mais son succès ira croissant après la Deuxième Guerre mondiale.

Les conférences offertes aux étudiants, de l'ordre d'une dizaine par an, ouvrent l'enseignement aux avancées scientifiques et industrielles récentes. En 1926-1927, interviennent ainsi neuf personnalités dont deux « professeurs d'échange » (professeurs invités sur plusieurs semaines) : l'un, de l'université de Liège, donne cinq conférences sur les turbines hydrauliques et les pompes centrifuges ; l'autre, de l'École d'ingénieurs de l'université John Hopkins (Baltimore) donne un cours sur la théorie des diélectriques et les hautes tensions électriques⁷⁴. L'institut reçoit également cette année-là la visite de professeurs espagnols et portugais. D'autres conférences portent, entre autres, sur les cellules photo-électriques, sur l'acoustique des bâtiments et des théâtres, sur « Notre conception actuelle de l'univers sidéral », sur la généralisation de la commande automatique des machines dans l'industrie, ou sur les vibrations ultrasonores (par Paul Langevin, du Collège de France).

4.4.3. Personnel enseignant

L'institut est affecté, après 1918, par de nombreux mouvements de personnel. Son ingénieur, M. Espagnol, part

⁷³ Règlement de l'Institut électrotechnique et de mécanique appliquée de l'université de Toulouse, titre III (Du diplôme d'ingénieur électricien) et titre IV (Du diplôme d'ingénieur mécanicien), applicable à partir du 1^{er} octobre 1931 (Arch. ENSEIHT).

⁷⁴ C. Camichel, *Rapp. UT 1926-1927 et années suivantes*.

fonder sa propre entreprise en 1919. Son poste est transformé en maîtrise de conférences d'électricité industrielle, attribuée à Florentin Nègre précédemment chef des travaux à l'université de Lille⁷⁵. Joseph Pérès, normalien et agrégé de mathématiques, est nommé en 1918 maître de conférences à la faculté des sciences et chargé de cours à l'institut électrotechnique. Nommé l'année suivante à Strasbourg, il est remplacé par Robert Deltheil⁷⁶. Adrien Foch, normalien et agrégé de physique, en thèse sous la direction de Camichel (cf. chap. 5), est nommé maître de conférences à l'institut en janvier 1921 par transformation du poste de préparateur qu'il occupait depuis 1918. Mais Foch quitte Toulouse en septembre de la même année pour un poste à Bordeaux. En 1923, Léon Jouane décède des suites d'une opération chirurgicale et il est remplacé par Florentin Nègre à la sous-direction de l'institut⁷⁷.

Plusieurs départs et remplacements d'assistants s'enchaînent, instabilité liée aux salaires nettement supérieurs offerts aux ingénieurs par l'industrie – situation que Camichel ne manque pas de relever régulièrement. Ces personnels sont essentiellement masculins, mais on relève, dans une note de Camichel, le passage d'une assistante :

Deux assistants de l'Institut électrotechnique, M. Bouscasse et Mlle Bedouce (devenue Mme Bouscasse) nous ont quittés pour entrer à la *Sociedad productora de fuerzas motrices* à Barcelone. Ils ont été remplacés par

⁷⁵ F. Nègre n'avait été classé qu'en seconde position par le conseil de la faculté (séances du 12 nov. 1919 et du 15 juill. 1920), derrière Joseph Rey, ancien officier de marine et ancien directeur de l'observatoire du pic du Midi, chargé d'enseignement à l'institut agricole ; c'est finalement Nègre qui a été nommé. Sur J. Rey, cf. Davoust (2000, p. 161-162).

⁷⁶ C. Camichel, *Rapp. UT 1918-1919*, p. 123. Joseph Pérès poursuivra sa carrière à Marseille, où il dirigera l'institut de mécanique des fluides de 1930 à 1932, puis à Paris. Membre de l'Académie des sciences, doyen de la faculté des sciences de Paris, il sera le premier président de l'Union internationale de mécanique pure et appliquée (IUTAM) (Charru, 2021).

⁷⁷ C. Camichel, *Rapp. UT 1918-1919*, p. 123 ; *Rapp. UT 1922-1923*, p. 75 ; *Rapp. UT 1924-1925*, p. 75. Jouane s'est essentiellement consacré aux considérables tâches pédagogiques de l'institut. On ne lui trouve qu'une publication : Sur l'élasticité du ciment pur, *C. R. Acad. Sc.* **167**, 591 (1918). Décède également en 1923 M. Andrau, ingénieur Arts et Métiers, assistant chargé des cours de technologie et de dessin.

M. Garrigues, ancien élève de l'Institut électrotechnique, premier de la promotion de 1921 et M. Andrau, ingénieur des Arts et Métiers qui est spécialement chargé de l'enseignement du dessin⁷⁸.

Le départ d'une autre enseignante, Mademoiselle Jouane, chargée des travaux pratiques de mécanique appliquée en quatrième année, est noté en 1924⁷⁹. Ces travaux pratiques sont repris par deux assistants appelés à jouer un rôle important dans le développement des recherches en hydraulique : Marcel Ricaud et Léopold Escande, ingénieurs de l'institut. L'année suivante, Ricaud est délégué dans les fonctions de maître de conférences d'électrotechnique pratique – sur le poste qu'occupait Jouane – mais il en démissionne en décembre 1926⁸⁰. Escande, qui ne possède alors pas les certificats requis pour lui succéder, n'accèdera à la maîtrise de conférences qu'en 1930, sur un poste créé par le ministère de l'Air (cf. chap. 6).

Max Teissié-Solier, ingénieur IET et licencié ès sciences, est nommé assistant en 1929 puis chef des travaux l'année suivante. Il prépare une thèse de doctorat en mécanique des fluides qu'il soutient en 1931. Pierre Dupin le remplace sur le poste d'assistant et soutient sa thèse en 1930. Étienne Crausse, nommé préparateur, s'engage dans la préparation d'une thèse de doctorat, et bénéficie de 1932 à 1936 d'une bourse de chargé de recherches de la Caisse nationale des sciences. Jean Baubiach, nommé préparateur, s'engage également dans une thèse de doctorat (cf. chap. 6).

La crise économique du début des années 1930, jointe à la diminution du nombre d'étudiants, entraîne des suppressions de postes universitaires dont, au niveau national, six chaires en 1934. L'année suivante, l'institut perd la maîtrise de conférences d'électrotechnique, vacante suite au départ à la retraite de Florentin Nègre. D'autres mouvements de personnel interviennent dans le cadre de l'institut de mécanique des fluides créé en 1930 (cf. chap. 6).

⁷⁸ C. Camichel, *Rapp. UT 1920-1921*, p. 89.

⁷⁹ Séance du 9 mai 1924 du conseil de la faculté. Le statut exact de Mlle Jouane n'est pas précisé.

⁸⁰ Séance du 9 mai 1924 du conseil de la faculté ; P. Sabatier, *Rapp. UT 1925-1926*, p. 53, et C. Camichel, *ibid.*, p. 76 ; Séance du 24 nov. 1926 du conseil de la faculté.

4.4.4. Transformation en institut d'université

La création en 1920 d'un nouveau type d'institut d'université (cf. chap. 2) amène la question au conseil de la faculté en juillet 1922. Des craintes s'y expriment alors de voir le prospère institut électrotechnique abandonner le reste de la faculté à ses maigres ressources. Camichel, qui jouit d'une grande autorité au sein du conseil – il en est l'assesseur –, se montre rassurant : questionné sur ce qu'il emportera de la faculté et ce qu'il lui rendra, il répond qu'il n'a jamais utilisé les crédits affectés à sa chaire et que la faculté n'en sera pas privée ; qu'il rendra au service de physique générale les instruments et le matériel qui lui ont été autrefois attribués ; et qu'il désire seulement garder le garçon de laboratoire attaché à son service. La transformation de l'institut électrotechnique est adoptée à l'unanimité. Elle devient effective en 1925, avec la création d'un budget spécial incorporé au budget de l'université⁸¹. Un nouveau règlement intérieur précise l'organisation des études : le conseil de perfectionnement, légèrement remanié, comprend désormais quatre enseignants de l'institut et quatre personnalités de l'industrie ; le secrétariat propre de l'institut comprend deux personnes – un secrétaire, Georges Bouteille, et une dactylographe –, chargées de la correspondance, du service scolaire, du service financier et du service du bureau de contrôle.

La convention de 1908 entre la Ville et l'université, arrivée à son terme en 1928, est alors renouvelée sans difficulté par le conseil municipal. Celui-ci réaffirme, à cette occasion, sa confiance dans l'institut :

Cette coopération de la Municipalité à l'Enseignement de l'électricité industrielle est d'autant mieux justifiée que l'Institut de Toulouse, groupant 500 étudiants environ est réputé comme l'un des établissements techniques les plus importants du monde entier⁸².

⁸¹ Séances des 19 juill. 1922, 16 nov. 1923, et 12 nov. 1924 du conseil de la faculté ; Décret du 28 avr. 1925 approuvant la délibération du conseil d'université du 23 janv. 1925 portant transformation de l'IETMA en institut de l'université. Arch. ENSEEIHT.

⁸² Rapport de la commission des finances de la Ville au conseil municipal le 11 févr. 1929 ; décret du 5 nov. 1929 de renouvellement pour vingt ans de la convention. Arch. ENSEEIHT.

La Ville s'engage notamment à assurer, en plus d'une subvention de fonctionnement de 15 000 francs, les traitements et indemnités du titulaire de la chaire ainsi que ceux du chef de travaux (47 680 francs et 25 680 francs, respectivement).

4.4.5. Émergence de la radioélectricité

La télégraphie sans fil (TSF, cf. chap 1) est introduite en 1908 dans les conférences publiques de Camichel. En 1913, une station de TSF est installée à l'institut. Le 31 décembre 1921 est marqué par la première émission radiophonique toulousaine, retransmission d'un concert donné à la tour Eiffel quelques jours auparavant. Camichel fait alors partie de la trentaine d'invités réunis pour l'occasion à la caserne Pérignon⁸³. L'enseignement de la radiotélégraphie est introduit dans la formation des ingénieurs en 1923, sous la forme d'une conférence semestrielle donnée par Pierre Dupin, ingénieur IET. En 1930, sont réalisés des essais de radiodiffusion du cours de Dupin, avec le concours de l'administration des Postes, télégraphes et téléphones (PTT). Le développement de cet enseignement aboutit à la création, en 1935, d'une section de radioélectricité préparant à un diplôme d'ingénieur radioélectricien de l'université de Toulouse, et à un diplôme d'études techniques supérieures de radioélectricité⁸⁴. Pierre Dupin, responsable de cette section, développe des recherches sur les communications hertziennes par ondes courtes (centimétriques). Il dirige notamment la thèse de doctorat d'université de Morched Zadeh, ingénieur IET, thèse soutenue en 1937. Des expérimentations avec le pic du Midi sont réalisées en collaboration avec l'astronome Henri Camichel, neveu de Charles⁸⁵.

⁸³ www.ladepeche.fr/2021/12/31/il-y-a-100-ans-le-31-decembre-1921-toulouse-decouvrait-la-radio-10020981.php

⁸⁴ Arrêté du ministre de l'Instruction publique du 25 mai 1923, et arrêté du ministre de l'Éducation nationale, du 24 juill. 1935, approuvant les délibérations du conseil d'université. Arch. ENSEIHT.

⁸⁵ Davoust (2000, p. 231-232).

Pour conclure. La création et l'essor remarquable de l'institut électrotechnique de Toulouse auront tenu à la ténacité de trois personnalités, issues d'horizons bien différents : Paul Sabatier, catholique conservateur, Charles Camichel, protestant socialisant, et Albert Bedouce, franc-maçon socialiste. Au-delà de leurs différences de sensibilité politique, une forte conviction commune lie ces personnalités, largement partagée par la société dans son ensemble : le progrès technique et l'industrialisation sont la clé du développement économique et social⁸⁶. L'hydroélectricité pyrénéenne apparaît alors comme une opportunité à saisir, qui doit permettre à la région de rattraper son retard lié à une situation géographique défavorable, éloignée des ressources en énergie et en matières premières.

Deux questions particulières auront fait cependant l'objet de vifs débats au sein de la communauté universitaire. La première est de savoir si l'université doit se préoccuper de la recherche appliquée, comme le pensent Sabatier et Camichel, ou privilégier « la recherche désintéressée », position de Bouasse et de Perroud. La seconde question est de savoir si la formation des ingénieurs – c'est-à-dire de « l'élite » – doit être prise en charge par la Ville, ou si celle-ci doit se limiter à la formation des ouvriers et contremaîtres en laissant à l'État celle des ingénieurs. Sur ces deux questions, c'est la position de Sabatier et Camichel qui aura finalement prévalu.

⁸⁶ Grossetti & Milard (1997).

Chapitre 5

Vers la mécanique appliquée

Une rivière qui reste une rivière, n'étant pas une « force » qu'on « exploite », mais le bon compagnon qui passe, le voisin serviable qui nous donne un coup de main sans presque s'arrêter, – à qui l'on dirait pour un peu merci, comme à un homme.

Gustave Roud, *Petit traité de la marche en plaine*, 1932

Dès sa création en 1907, l'institut électrotechnique de Toulouse marque un net intérêt pour l'hydraulique et la mécanique appliquée, en relation avec l'essor de l'hydroélectricité pyrénéenne (§ 5.1). Cette inflexion se confirme à partir de 1913 où, suite aux relations nouées avec la Compagnie des chemins de fer du Midi, est créé un laboratoire d'hydraulique (§ 5.2). Le succès de ce laboratoire entraîne son extension sur l'île du Ramier, tandis que se développent, au côté des études pour l'industrie, des recherches plus fondamentales de mécanique des fluides (§ 5.3).

5.1. L'hydroélectricité pyrénéenne

L'usage de machines hydrauliques est une tradition ancienne dans les Pyrénées, pour l'entraînement de roues de moulins et le fonctionnement de scieries, forges, ateliers de tissage ou fabriques de pâte à papier¹. Au milieu du XIX^e siècle, 100 000 pyrénéens vivent ainsi de l'exploitation du minerai de fer, et l'on compte une centaine de forges en activité. Cette activité décline à partir de 1860, du fait notamment de l'implantation de hauts-fourneaux dans les basses vallées, qui concentrent la production et

¹ Crausse (2008, chap. 2).

amorcent l'exode rural. Un regain d'activité s'observe cependant à partir de 1885 avec la transformation des moulins et forges en usines hydroélectriques qui permettent à la petite industrie de s'affranchir de la proximité immédiate des cours d'eau. À Toulouse, le moulin du Bazacle sur la Garonne s'électrifie en 1889 : une dynamo d'une puissance de 150 kilowatts alimente alors 72 abonnés en courant continu à 150 volts, principalement pour l'éclairage². De nombreuses communes des Pyrénées s'électrifient dans la décennie suivante – Quillan, dans l'Aude, dès 1888. En 1903, un recensement des chutes d'eau aménagées donne, pour les 90 usines de plus de 75 kilowatts (100 chevaux), une puissance totale installée de 23 000 kilowatts pour la lumière et la force motrice (26 usines), la traction ferroviaire (6 usines), l'électrochimie et l'électrometallurgie (6 usines), et diverses industries. L'hydroélectricité pyrénéenne apparaît toutefois, à l'orée du xx^e siècle, d'une importance modeste comparée à celle des Alpes, situation liée à la faible industrialisation du Sud-Ouest et à la distance séparant les sites de production des centres urbains.

La décennie 1910 voit un net développement de l'électrochimie et de l'électrometallurgie d'une part, et de la traction ferroviaire électrique d'autre part³. En Ariège, les compagnies industrielles les plus importantes sont la Société métallurgique de l'Ariège (fondée à Pamiers en 1866), la Société des produits électrochimiques des Pyrénées (fondée en 1908 par Georges Bergès, fils d'Aristide) et la Société d'aluminium du Sud-Ouest (1913). Les deux dernières sont alimentées par la puissante centrale d'Auzat (13 500 kilowatts). Dans la vallée d'Aure, la Société d'aluminium du Sud-Ouest construit la centrale de Bleyrède-Jumet (1912, 7 500 kilowatts), qui alimente deux usines pour la fusion de la bauxite, la fabrication d'abrasifs à base d'alumine, et la fabrication de chlorate de soude. L'hydroélectricité profite également aux papèteries, grosses consommatrices d'énergie pour le défibrage du bois, les machines à pâtes et les presses. En 1917, on compte une vingtaine d'usines d'une puissance

² Bouneau (1992). Toujours en service en 2024 et exploitée par EDF, l'usine du Bazacle délivre 3 000 kilowatts.

³ Crausse (2008, chap. 3).

supérieure à 100 kilowatts, notamment sur la Garonne (Le Foulon à Saint-Martory, Sirven à Toulouse) et sur le Salat (dont Job, en amont de Saint-Girons, célèbre pour son papier à cigarettes).

Mais le facteur le plus important de développement de l'hydroélectricité pyrénéenne est l'électrification de la traction ferroviaire, menée, à partir de 1910, par la Compagnie des chemins de fer du Midi. L'essor du réseau ferroviaire va alors entraîner celui d'autres industries, associées au percement des tunnels du Somport et du Puymorens ou à l'exploitation de ressources minières (marbre dans les Basses-Pyrénées, sel à Salies-du-Salat, talc à Luzenac).

Deux précurseurs, Joachim Estrade et George Moulun.

Deux personnalités remarquables marquent le développement de l'hydroélectricité pyrénéenne au début du xx^e siècle : Joachim Estrade et George Moulun⁴. Estrade (1857-1936), né à Arreau, est un ingénieur des Arts et Métiers d'Aix-en-Provence. Après avoir installé à titre privé, en 1888, l'éclairage électrique dans les communes de Quillan et d'Alet-les-Bains, dans l'Aude, il obtient en 1891 la concession de la distribution d'électricité à Narbonne et Carcassonne. En 1901, il fonde la Société méridionale du transport de force (SMTF) qui met en service, la même année, la première usine pyrénéenne de haute chute à Saint-Georges sur l'Aude (2 700 kilowatts). Ses lignes vers Carcassonne, Narbonne et La Nouvelle, sur le littoral méditerranéen, réalisent un record de tension (20 000 volts alternatifs à 50 hertz) et confirment les avantages du courant alternatif sur le courant continu. En 1905, le réseau d'Estrade alimente ainsi plus de 100 communes, profitant à 150 000 habitants. Le succès commercial de l'entreprise – qui impose cependant que les moteurs s'arrêtent le soir pour permettre l'éclairage ! – engendre son extension vers les Pyrénées-Orientales. En 1916, une nouvelle centrale est mise en service sur l'Aude, à Gesse, de 7 500 kilowatts. Propagandiste et vulgarisateur de talent, Estrade est l'auteur de plusieurs innovations relatives aux lignes électriques. Il est également le créateur d'une société d'électromotoculture qui propose notamment un treuil de labourage électrique des vignes (dont la diffusion commerciale restera cependant limitée).

⁴ Bouneau (1992).

George Moulun (1870-1946), ingénieur de l'École polytechnique, crée en 1907 la Société pyrénéenne d'énergie électrique (SPEE) avec l'appui financier du baron Amédée Reille. Son usine d'Orlu, mise en service en 1910, réalise un record de hauteur de chute, conservé jusqu'à la fin des années 1930 : 936 mètres entre la retenue du lac de Naguilhes et la rivière l'Oriège. La galerie d'aménée de l'eau, en charge de 26 mètres sous la surface du lac, est longue de 1760 mètres ; les 13 000 kilowatts délivrés par cinq turbines Pelton alimentent Toulouse par une ligne de 150 kilomètres à 55 000 volts. En 1918, le réseau développé par Moulun – long de 1250 kilomètres – alimente 420 000 habitants. On compte alors dans les Pyrénées une dizaine de sociétés concurrentes, dont la Société toulousaine du Bazacle déjà mentionnée. La puissance disponible par abonné est voisine de 250 watts.

La Compagnie des chemins de fer du Midi. Créée en 1852, la Compagnie des chemins de fer du Midi est l'une des six compagnies ferroviaires françaises bénéficiaires de concessions d'exploitation. Le réseau dense de lignes qu'elle installe dans le Sud-Ouest contribue largement au développement économique régional⁵. Le transport ferroviaire, alors tracté par des locomotives à vapeur, se trouve cependant entravé par l'éloignement des mines de charbon – les plus proches sont celles de Carmaux et de Decazeville, dans l'Aveyron. Cette situation, associée aux progrès des moteurs électriques, incite la compagnie à se convertir à la traction électrique, à partir d'une électricité qu'elle va produire dans ses propres usines hydroélectriques.

La traction électrique présente par ailleurs plusieurs avantages sur la traction à vapeur. Elle éradique le problème des fumées dans les tunnels et les risques d'incendie par dispersion d'escarbilles et de fumerolles – problème sérieux notamment sur la ligne Bordeaux-Bayonne qui traverse la forêt de pins des Landes. Elle autorise également des pentes plus fortes, supérieures à 4 %. La première ligne à traction électrique, mise en service en 1910, prolonge jusqu'à Bourg-Madame (Cerdagne) la ligne à vapeur Perpignan – Villefranche-de-Conflent. Longue de 56 kilomètres et présentant des pentes de 6 % au

⁵ Bouneau (1989).

franchissement du col de la Perche, cette ligne est alimentée à 850 volts en courant continu sur un troisième rail. L'électricité est produite par l'usine de La Cassagne sur la rivière Têt. Cette usine, alimentée par des conduites forcées en provenance du lac des Bouillousses (dont le barrage est édifié entre 1906 et 1910), délivre une puissance de 4,5 mégawatts à 20 000 volts alternatif et fournit également l'électricité pour l'irrigation des cultures du Roussillon. Le succès de l'opération entraîne l'électrification de nombreuses lignes dans les années suivantes, dont Perpignan – Villefranche-de-Conflent (1913), Pau – Tarbes (1917) et Tarbes – Montréjeau (1918). Des embranchements vers les vallées (Pierrefitte, Bagnères-de-Bigorre, Arreau et Luchon) sont mis en service entre 1914 et 1925. Deux lignes transpyréennes sont également ouvertes, d'Oloron à Canfranc, et d'Ax-les-Thermes à Puigcerda (1928).

Dans les Pyrénées centrales, la première réalisation hydroélectrique d'envergure de la Compagnie du Midi est l'usine du Soulom (16 mégawatts), inaugurée en 1913, et destinée à la ligne ferroviaire Pau – Montréjeau. Établie au confluent des gaves de Cauterets et de Pau, elle est alimentée par deux chutes (de 113 et 250 mètres). Cette réalisation fait l'objet d'études hydrauliques originales réalisées en collaboration avec l'institut électrotechnique de Toulouse (cf. section suivante). La grande réalisation suivante de la Compagnie du Midi est l'usine d'Éget (25 mégawatts), dans la vallée de la Neste, mise en chantier en 1908 mais achevée seulement en 1923 du fait de la guerre. Viendra ensuite l'aménagement de la vallée d'Ossau (Artouste, 100 mégawatts).

La Compagnie du Midi, dirigée par un ingénieur polytechnicien d'envergure, Jean-Raoul Paul, voit bientôt sa capacité de production excéder largement ses besoins ferroviaires⁶. Se déployant tant dans la production que

⁶ Jean-Raoul Paul (1869-1960), né près de Libourne (Gironde), polytechnicien et ingénieur des Ponts et Chaussées, entre à la Compagnie des chemins de fer du Midi en 1899. Il y promeut la traction électrique (il participe en 1902 au premier congrès de *La Houille Blanche*, à Grenoble), puis en prend la direction de 1913 à 1932. Grand ingénieur organisateur et novateur, administrateur et conseiller de nombreuses entreprises, Paul est un acteur majeur du développement économique du Sud-Ouest – on lui doit notamment la route du col du Tourmalet (Bouneau, 1988).

dans la distribution, elle devient ainsi un acteur majeur de l'électrification générale du Sud-Ouest. Au sein de l'Union des producteurs d'électricité des Pyrénées occidentales (UPEPO), créée en 1922 à l'instigation ministère des Travaux publics, la Compagnie joue un rôle déterminant dans la standardisation et l'interconnexion des réseaux⁷. Mais sa position dominante lui attire la critique des autres producteurs qui jugent sa concurrence déloyale. La Compagnie décide alors, en 1929, de se séparer de son activité de production en créant une filiale, la Société hydro-électrique du Midi (SHEM), dont le premier directeur est Jean Leclerc du Sablon⁸. La SHEM se voit attribuer, pour 99 ans, des concessions sur toute la chaîne des Pyrénées et dans le Massif central.

Thermalisme et tourisme pyrénéens. Le thermalisme pyrénéen, très en vogue depuis le Second Empire, génère à la fin du XIX^e siècle une importante activité. En 1906, un journaliste décrit ainsi Luchon comme « un des séjours favoris de toutes les élégances mondaines [...] où l'on se soigne gaiement »⁹. L'électricité y connaît un essor précoce : Argelès-Gazost est éclairée dès 1888, Cauterets et Luchon en 1890, Amélie-les-Bains en 1892. Pierrefitte, Cauterets et Luz sont desservies par une ligne de tramway, dite ligne *PCL*, électrifiée dès 1901. Superbagnères, à 1800 m d'altitude, est accessible par un train à crémaillère mis en service en 1912 par la Compagnie du Midi. En 1914, le réseau ferroviaire régional dessert 24 stations.

⁷ Bouneau (1997).

⁸ Jean Leclerc du Sablon (1891-1964), né à Toulouse, ingénieur polytechnicien (1910), est affecté en 1920 au Service des forces hydrauliques du Sud-Est. En 1922, il vient « pantoufler » à la Compagnie du Midi, affecté à Toulouse au Service de construction des usines hydroélectriques (alors dirigé par son camarade de corps Denis Eydoux), service dont il prend la direction en 1927. En 1929, il devient directeur de la nouvelle SHEM, et, l'année suivante, administrateur de l'UPEPO. Il enseigne l'hydraulique à l'IET de 1929 à 1934. Il est en 1937 le dernier directeur – éphémère – de la Compagnie du Midi, alors nationalisée et absorbée dans la SNCF. Grand montagnard surveillant de près les chantiers d'altitude, sa Torpédo rouge bousculant les brebis est restée fameuse (Bouneau, 1988). Jean Leclerc du Sablon est le fils du botaniste Mathieu Leclerc du Sablon (1859-1944), grande figure de l'université de Toulouse (cf. chap. 4).

⁹ Cité par Crausse (2008, p. 61).

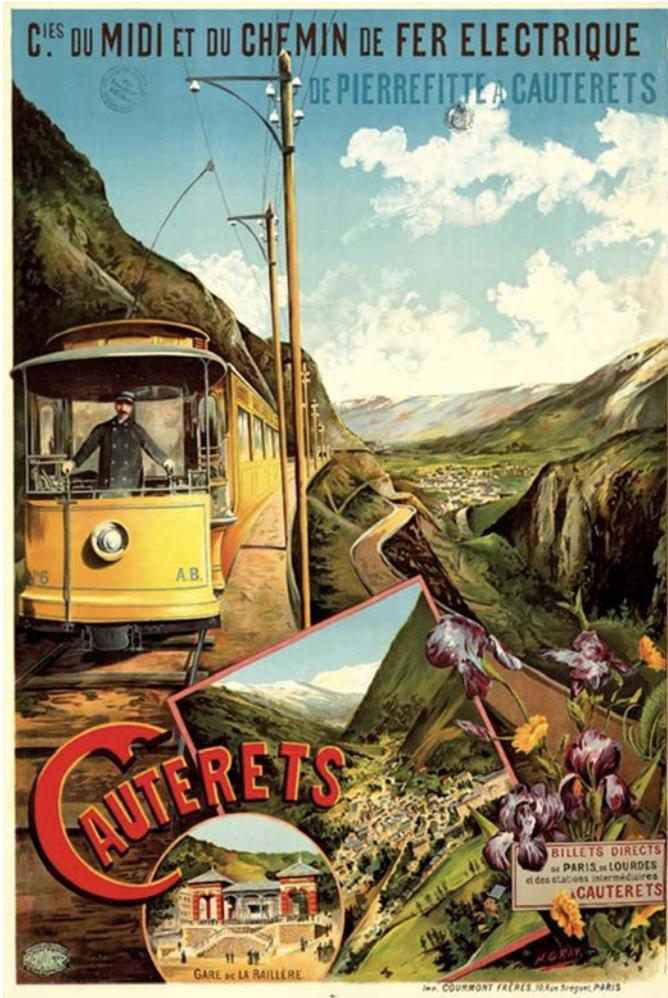


Figure 5.1 Affiche de Henri Gray pour la Compagnie du Midi (c. 1904).

Le trafic annuel, pour chacune des villes de Bagnères-de-Bigorre, Cauterets et Luchon, est de 200 000 voyageurs. La ville de Lourdes attire quant à elle 600 000 pèlerins. Par ailleurs, le tourisme d'hiver et la pratique du ski se développent, attirant une clientèle aisée, tant française qu'espagnole. Afin de mieux tirer profit de cette manne touristique, la Compagnie du Midi crée en 1911 une filiale, la Société des chemins de fer et hôtels de montagne (CHM), qui achève notamment la construction du Grand Hôtel de Font-Romeu, ouvert en 1913. Elle crée également la Société thermale des Pyrénées, qui gère hôtels et casinos ainsi que des lignes d'autocars touristiques.

Ce contexte de développement de l'électrification régionale va largement contribuer à l'essor de l'institut électrotechnique de l'université de Toulouse.

5.2. Développement de la mécanique appliquée

5.2.1. Enjeux industriels régionaux et nationaux

L'inflexion de l'institut électrotechnique vers la mécanique se traduit en 1913, comme indiqué au chapitre précédent, par la création d'un laboratoire d'hydraulique et d'une section spéciale de mécanique appliquée, créations consacrées par l'ajout de la mention « mécanique appliquée » à l'intitulé de l'institut (dont le sigle devient IETMA). Cette évolution correspond aux liens développés avec l'industrie hydroélectrique régionale, comme l'expliquera Camichel :

On s'est demandé souvent pourquoi nous nous étions orientés dans le sens de l'hydraulique. La réponse est facile : c'est une conséquence directe des idées qui ont présidé à la constitution des Universités régionales [dans le cadre de la réforme de 1896]. Ces recherches étaient, en effet, nécessaires dans une région où l'industrie électrique est surtout d'exploitation et de houille blanche [...]. Ce sont là des applications du principe de l'adaptation au milieu. [...] Nous appliquâmes ainsi nos idées sur la liaison du laboratoire et de l'industrie¹⁰.

Des liens privilégiés sont établis, dès 1910, avec la Compagnie des chemins de fer du Midi et plus particulièrement avec son ingénieur en chef Denis Eydoux. La collaboration porte initialement sur les aménagements hydroélectriques dans la vallée des gaves de Pau et de Cauterets (pertes de charge dans les conduites, mesure de

¹⁰ C. Camichel, *in* (Association Amicale des Ingénieurs Anciens Elèves de l'IETMA de Toulouse, 1936, p. 46-54).

gros débits, fonctionnement des turbines Francis, etc.)¹¹. La création du laboratoire est également soutenue par la Société hydrotechnique de France (SHF), qui, déjà liée avec l'université de Grenoble, souhaite étendre son champ d'action dans les Pyrénées¹².

L'importance nationale prise par l'hydroélectricité entraîne la création par le ministère des Travaux publics, en 1918, d'un « Comité d'études et de recherches scientifiques pour l'aménagement et l'utilisation des forces hydrauliques ». À l'instigation d'Albert Bedouce, rapporteur de la commission des finances et député de Toulouse, des sommes importantes sont versées au budget de ce comité pour subventionner les laboratoires s'occupant d'études hydrauliques. Le laboratoire toulousain reçoit ainsi 200 000 francs en 1918, puis 240 000 francs et 300 000 francs les deux années suivantes¹³. La contribution du ministère de l'Instruction publique, 19 000 francs en 1919, apparaît bien faible en comparaison. Une note parlementaire sur les besoins de l'université de Toulouse, en 1920, s'en émeut : après avoir souligné le doublement des étudiants inscrits à l'IET, elle observe que

l'Institut Électrotechnique, dont les installations actuelles représentent aux prix d'avant-guerre une valeur de 700 000 francs, n'a reçu au total de l'État que des subventions presque insignifiantes, et a dû jusqu'ici se contenter presque exclusivement des concours locaux¹⁴.

¹¹ Camichel (1929). Denis Eydoux (1876-1969), polytechnicien, chef du Service des recherches d'hydraulique à la Compagnie du Midi, sera ensuite maître de conférences (1918) puis professeur aux Ponts et Chaussées (1924-1950) et directeur des études à l'École polytechnique (1925-1945). Il est auteur de plusieurs ouvrages d'hydraulique. (Source ENPC.)

¹² Un projet de convention est discuté au conseil de la faculté des sciences dans sa séance du 31 oct. 1917.

¹³ C. Camichel, Rapport sur les études hydrauliques menées à l'IETMA de Toulouse et subventionnées par le ministère des Travaux publics, 6 juin 1919. Arch. nat. F17 14566 ; *Rapp. UT* 1919-1920.

¹⁴ Note parlementaire sur les besoins de l'université de Toulouse – Programme d'ensemble et ordre d'urgence (1920). Cette note consacre trois pages à l'IET. Arch. municip. 1R325-327.

L'Instruction publique entend la critique et accorde 200 000 francs en 1922. Des subventions sont également obtenues du Conseil départemental, de la SHF, et de sociétés telles que la Société de la Peñarroya, la Société des ferromneries du Midi, la Compagnie française des métaux, ou la Société des tréfileries et laminoirs du Havre¹⁵.

5.2.2. Le laboratoire d'hydraulique

Installations du boulevard Riquet. Le laboratoire d'hydraulique, installé entre 1910 et 1913 dans la cour intérieure de l'institut (cf. chap. précédent), devient dans l'après-guerre le cœur de l'institut. Il répond à une nécessité sur laquelle Camichel revient souvent, comme ici dans une demande de subvention :

Dans le domaine de l'hydraulique, on ne doit entreprendre à l'usine un essai « en grand », c'est-à-dire mettant en jeu de grandes quantités de matières et une énergie considérable, qu'après avoir étudié au Laboratoire des phénomènes réduits. Ils y sont plus accessibles et on peut modifier avec plus de facilité les conditions dans lesquelles ils se produisent¹⁶.

La pièce maîtresse du laboratoire est un réservoir d'eau de 20 mètres cubes au sommet d'un pylône métallique de 20 mètres de hauteur (Figures 5.2 et 5.3). De ce réservoir, des conduites forcées alimentent un canal à surface libre, pour l'étude de déversoirs, et des turbines utilisées dans le cadre des travaux pratiques des étudiants. L'eau, collectée dans un bassin de 80 mètres cubes, est ensuite refoulée dans le réservoir. L'ensemble communique avec le canal du Midi.

Les subventions obtenues après la guerre permettent, outre l'amélioration des installations existantes, la construction d'un vaste bâtiment de trois étages à l'angle du boulevard Riquet et de la rue des Écoles (Figure 5.4)¹⁷.

¹⁵ Conseil de la faculté des sciences du 31 oct. 1917 ; *Rapp. UT* 1918-1919 ; *Rapp. UT* 1922-1923.

¹⁶ C. Camichel, *ibid.*, p. 6-7. Arch. nat. F17 14566.

¹⁷ C. Camichel, rapport du 12 déc. 1924 pour la transformation de l'institut de faculté en institut d'université. Arch. ENSEEIHT.

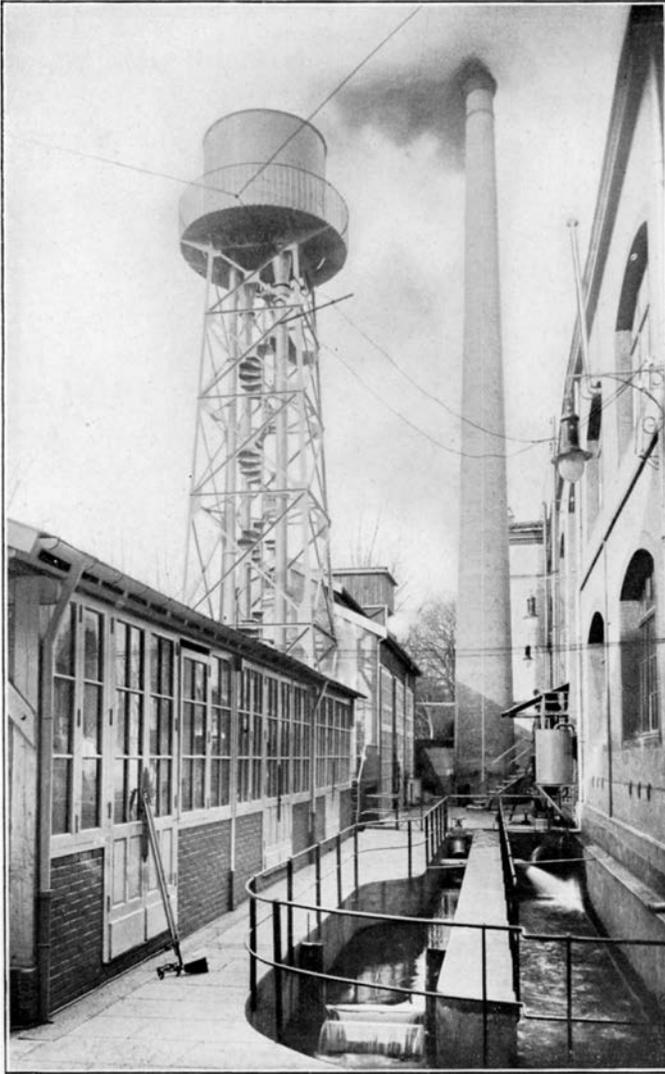


Figure 5.2 Cour du laboratoire d'hydraulique : pylône et réservoir supérieur de 20 m^3 , chaufferie, tour réfrigérante (au fond), cheminée, bache avec ajutages en mince paroi, dispositif pour les essais d'ajutages, déversoir et bassin inférieur de 80 m^3 .

Ce bâtiment, achevé en 1924, comporte notamment deux bassins en ciment armé de 200 et 300 mètres cubes. Il est équipé de canaux, brise-jets, fosses de mesures, appareils de levage et de manutention, et de nombreux appareils de mesure. Un nouveau château d'eau de 30 mètres de hauteur, en ciment armé, permet d'obtenir des débits d'eau de 600 litres par seconde.

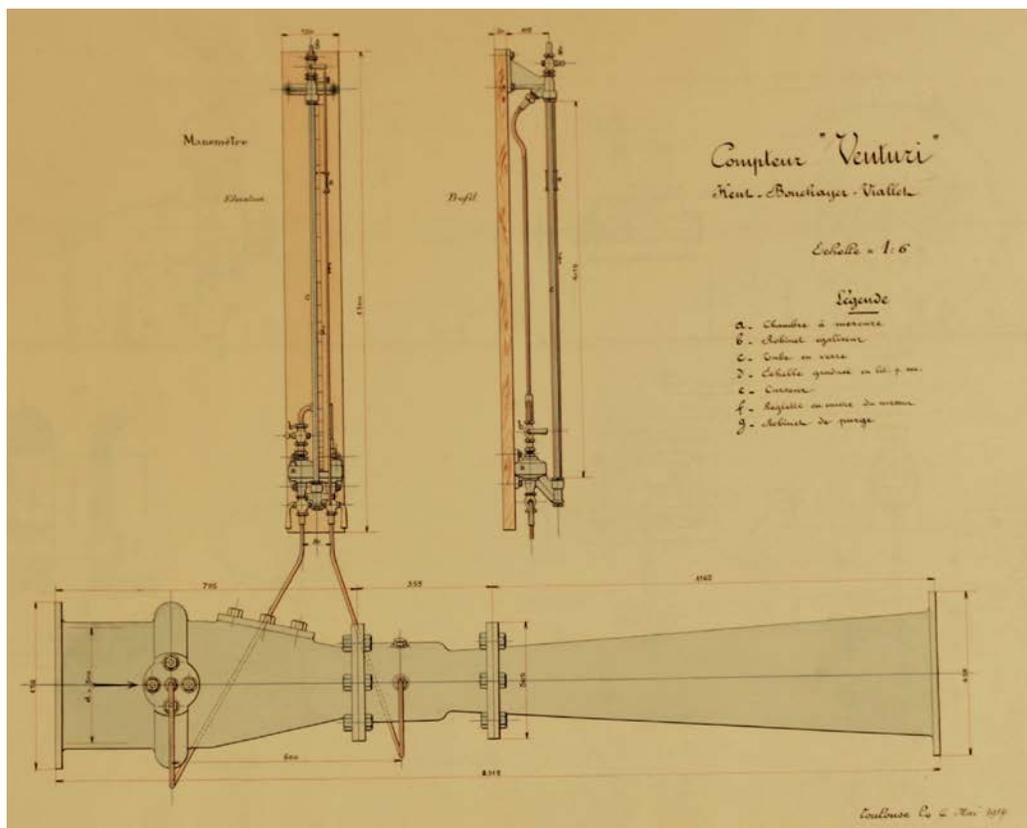


Figure 5.3 Système Venturi (convergent-divergent) de mesure du débit dans une conduite forcée du laboratoire d'hydraulique. Le diamètre de la conduite est de 300 mm. Le dessin, extrait d'un cahier de travaux pratiques, est daté du 4 mai 1914. Arch. IMFT, fonds Crausse.

La station de tarage des Ponts-Jumeaux. En 1921, l'administration des Ponts et Chaussées remet à l'IETMA son installation d'essais et de contrôle des moulinets (instrument de mesure de la vitesse de l'eau dans les canaux)¹⁸. Cette installation, située au lieu-dit des Ponts-Jumeaux, utilise un petit canal longeant le canal latéral à la Garonne. Elle permet, en plus des opérations techniques d'étalonnage, d'organiser des travaux pratiques pour les étudiants.

¹⁸ Décision ministérielle du 21 avr. 1921. Arch. ENSEIHT.



Figure 5.4 Au fond de la cour de l'IET, laboratoire d'hydraulique et son château d'eau alimentant les modèles réduits (1924) ; au premier plan, le modèle de la Garonne à Toulouse. Arch. IMFT, fonds Crausse.

5.2.3. Premières études

Les premières études du laboratoire portent sur l'aménagement de l'usine de Soulom de la Compagnie du Midi. Il s'agit d'une part de valider la mesure de gros débits d'eau par jaugeurs Venturi, à l'usine et sur des modèles réduits au laboratoire, et d'autre part de tester un dispositif de siphon d'interruption automatique du débit en cas d'avarie. Ces travaux sont publiés en 1914 dans la revue *La Lumière Électrique* et au deuxième congrès de La Houille Blanche¹⁹. D'autres investigations portent sur

¹⁹ Camichel *et al.* (1914a,b).



Figure 5.5 Conduite forcée écrasée par une dépression consécutive au dysfonctionnement d'un siphon de prévention des coups de bélier, au-dessus de la centrale du Hourat (vallée d'Ossau), au cours de l'hiver 1928-1929. Arch. IMFT, fonds Crausse.

les « coups de bélier » dans les conduites, phénomènes potentiellement destructeurs induits par des variations brusques des conditions d'écoulement (Figure 5.5). Une étude approfondie du problème est menée par Camichel, Eydoux et un ingénieur de la société grenobloise NBPP, Maurice Gariel (cf. chap. 3). Elle donne lieu dès 1915 à la publication de plusieurs notes aux *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, à des articles dans les revues *La Houille Blanche* (revue de la SHF) et *La Lumière Électrique* (qui devient en 1917 la *Revue Générale de l'Électricité*), ainsi qu'à la publication d'un ouvrage de 400 pages de synthèse des résultats²⁰. Ce problème fait l'objet de la thèse de doctorat de Eydoux, première thèse du laboratoire, soutenue en 1919²¹. Ces études permettent à Camichel d'engager

²⁰ Camichel *et al.* (1918).

²¹ Cf. Annexe A pour la liste des thèses.

des recherches plus fondamentales sur la propagation des ondes de pression, sur les rôles respectifs de la compressibilité de l'eau et de l'élasticité des conduites, sur la prise en compte de la variation des caractéristiques de ces conduites, ou sur l'effet d'une modulation du débit, physique relevant de ce que Camichel appelle « l'acoustique des conduites »²².

Une autre thèse est engagée par Adrien Foch (1887-1980), normalien et agrégé de physique, sur les écoulements en conduite comportant des bulles d'air. Engagé en février 1919 comme préparateur, Foch soutient sa thèse l'année suivante à Paris. Son poste de préparateur transformé en janvier 1921 en maîtrise de conférences, Foch est alors chargé du bureau de contrôle et d'essais, lequel, argumente Camichel, « est appelé à un grand développement en raison de la construction d'un bon nombre d'usines dans la région ». Mais en avril de la même année, Camichel expose au conseil de la faculté « les diverses raisons par lesquelles il lui semble qu'il n'y a pas lieu de maintenir la maîtrise de conférences créée par décision du 23 décembre 1920 et confiée actuellement à M. Foch »²³. Suite à quoi le conseil vote à l'unanimité le non-renouvellement du poste, « et exprime le vœu que le titulaire actuel soit pourvu le plus tôt possible d'une maîtrise de conférences de physique dans une autre Faculté ». Foch quitte Toulouse en novembre pour un poste de chargé de cours à Bordeaux, où il sera nommé deux ans plus tard professeur de physique expérimentale²⁴.

²² C. Camichel, Rapport sur les études hydrauliques menées à l'IETMA de Toulouse et subventionnées par le ministère des Travaux publics, 6 juin 1919, Arch. nat. F17 14566.

²³ Séances du 13 nov. 1920 et du 13 avr. 1921 du conseil de la faculté ; les « diverses raisons » du non-renouvellement ne sont pas explicitées et n'ont pas pu être éclaircies.

²⁴ Adrien Foch (1887-1980), né à Sète, normalien et agrégé de physique (1911) puis agrégé préparateur à l'ENS, travaille pendant la Première Guerre mondiale à la direction des Inventions créée par Painlevé. Le laboratoire parisien où il avait commencé une thèse ayant été détruit pendant la guerre, il engage une nouvelle thèse au laboratoire d'hydraulique de l'institut électrotechnique de Toulouse (IETMA), sur les coups de bélier, soutenue à Paris en avril 1920. Préparateur (fév. 1919) puis maître de conférences à l'IETMA (janv. 1921), il part en nov. 1921 comme chargé de cours à Bordeaux, où il est nommé professeur de physique expérimentale en 1923.

La similitude des écoulements. Les installations de l'IET permettent l'étude à échelle réduite d'installations hydrauliques de grandes dimensions, de façon contrôlée et bien instrumentée. Ce type d'étude suppose une ressemblance des écoulements aux deux échelles et soulève la question des « lois de similitude » permettant l'extrapolation des résultats de l'échelle réduite à l'échelle réelle. Cette question fondamentale fait l'objet de la thèse d'un brillant étudiant de l'IET, Léopold Escande :

Dans la construction des grands ouvrages hydrauliques modernes, [...] les ingénieurs ont recours à l'emploi de modèles reproduisant à petite échelle l'ouvrage projeté, et sur lesquels on étudie, en réduction, les diverses circonstances de l'écoulement. [...] La similitude hydrodynamique a précisément pour objet de fournir l'ensemble des lois qui régissent ainsi la technique des essais sur modèles réduits²⁵.

Sur cette thématique de la similitude, un professeur à l'Université impériale d'Hokkaido (Japon), M. Kikuro Otsubo, effectue en 1931 un séjour de six mois au laboratoire d'hydraulique, sur les tourbillons à axe vertical aéré (tourbillons apparaissant lors de la vidange de réservoirs à surface libre).

En 1929, il obtient la maîtrise de conférences de mécanique expérimentale des fluides attachée à la chaire de Henri Bénard à Paris. Professeur sans chaire en 1931, il enseigne dans plusieurs écoles parisiennes et obtient la chaire de Bénard en 1939. Lauréat de trois prix de l'Académie des sciences, officier de la Légion d'honneur, il est auteur de plusieurs ouvrages pédagogiques réédités (Foch, 1932, 1934). Il a épousé en 1915 Jeanne Pérès sœur de Joseph Pérès. Sources : AN AJ16 5738 (dossier Foch) ; Arch. Acad. Sc. ; Charle & Telkès (1989) ; Conseils de la faculté des sciences de Toulouse du 12 nov. 1919, 13 nov. 1920, 13 avr. 1921. Publications liées à la thèse : A. Foch, *C. R.* **169**, 569, 687 (1919) ; Ch. Camichel, D. Eydoux & A. Foch, *C. R.* **171**, 783 (1920).

²⁵ Cf. Annexe A. La thèse est publiée la même année sous la forme de quatre articles dans la *Revue Générale de l'Électricité* (Escande, 1929).

5.3. Extension du laboratoire sur l'île du Ramier

Les études sur modèles réduits se développant, les locaux du boulevard Riquet, en bordure du canal du Midi, s'avèrent bientôt insuffisants. Camichel revient alors vers la municipalité, en 1917, pour la cession d'un nouveau terrain. La négociation va durer plus de deux ans, huit sites possibles seront successivement envisagés.

5.3.1. Premières expérimentations sur le « canal courbe »

Le site finalement retenu est le lieu-dit de Banlève, sur l'île du Ramier entre deux bras de la Garonne, à l'entrée du Parc toulousain. Un rapport des services techniques de la Ville, en janvier 1920, conclut en effet que « la solution Banlève a paru la plus avantageuse à tous les points de vue », et poursuit :

Il faut en outre remarquer que l'installation de laboratoires sur les terrains de Banlève, loin de nuire à l'esthétique du Parc toulousain contribuerait au contraire à l'embellir [...] ; ces laboratoires seraient installés dans un véritable jardin qu'on pourrait ouvrir au public le dimanche en réalisant ainsi une leçon de choses et de vulgarisation d'une portée très grande à Toulouse qui est la capitale de la Houille Blanche pour la région des Pyrénées.

En mettant à la disposition de l'Université de Toulouse, les terrains et la chute de Banlève, la municipalité de Toulouse contribuerait puissamment au développement des recherches et de l'enseignement technique dans notre région²⁶.

Le site comprend un canal où seront conduites les premières expérimentations. Il convient parfaitement à Camichel qui racontera ainsi les circonstances du choix :

Quand l'espace manqua, qu'il fallut exécuter des expériences à grande échelle avec des débits considérables,

²⁶ Rapport sur l'organisation éventuelle d'un laboratoire à Banlève, 14 janv. 1920, Arch. municip. 1R325-327.

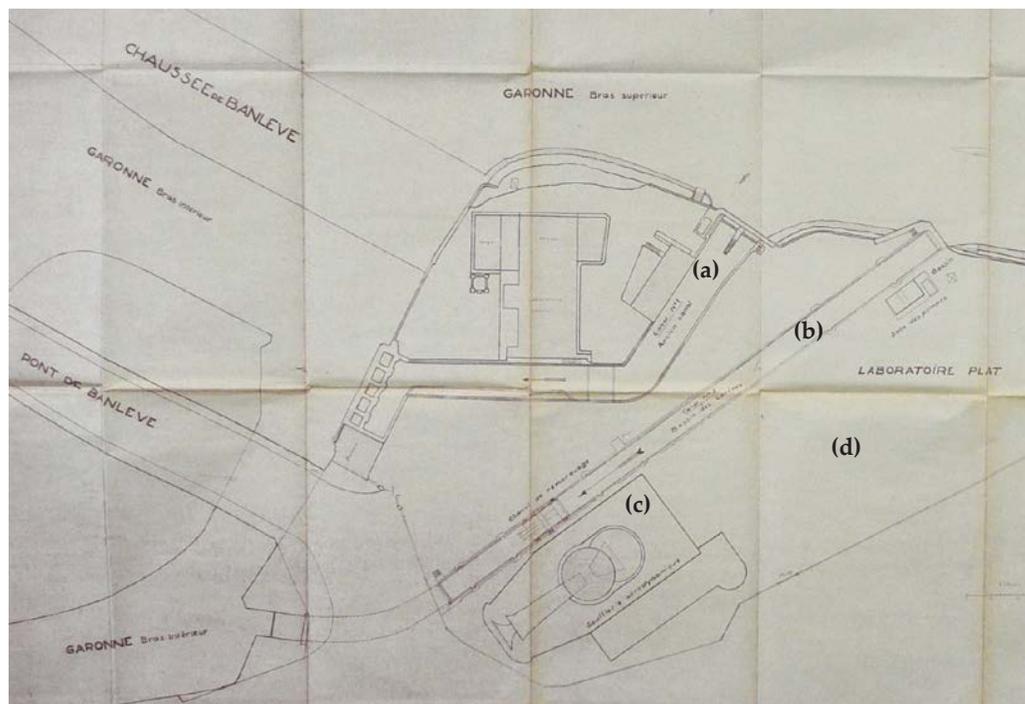


Figure 5.6 Laboratoire d'hydraulique de Banlève en 1948 (Nord à gauche) ; (a) canal coudé originel entre le bras supérieur de la Garonne et l'aval de la chaussée ; (b) canal droit (1932) ; (c) soufflerie (1936) ; (d) laboratoire plat (1943) ; le terrain plus à droite (non représenté) ne sera occupé que plus tard. Arch. IMFT.

nous songeâmes à trouver au voisinage d'un cours d'eau l'emplacement d'un nouveau laboratoire. [...] Comme nous examinions [avec Bedouce] la plaine de la Garonne du haut du tertre préhistorique qui se trouve sur les collines de Pech-David, en face de la poudrerie, il eut l'idée tout à fait remarquable de nous proposer le barrage de Banlève. Il était impossible de faire un choix mieux adapté aux conditions de nos expériences et de mieux prévoir nos besoins²⁷.

²⁷ Réponse de M. Charles Camichel aux discours en son honneur lors de sa réception à l'Institut, *in* (Association Amicale des Ingénieurs Anciens Élèves de l'IETMA de Toulouse, 1936, p. 59-62).



Figure 5.7 Partie amont du canal courbe du laboratoire de Banlève et son déversoir étalon de Bazin. On voit, de part et d'autre du déversoir, les événements prévenant toute dépression sous la lame d'eau déversante.

La convention entre la Ville et l'université, signée en 1920, précise que le laboratoire prendra le titre de « Laboratoire d'hydraulique des Pyrénées et du Massif central (Fondation de la Ville) ». Le terrain concédé, de 15 000 mètres carrés, est bordé à l'est par le bras droit de la Garonne et au nord par la chaussée de Banlève (Figure 5.6). Il inclut un canal dit « canal courbe » entre l'amont et l'aval de la chaussée, composé de deux tronçons formant un coude et d'une longueur totale de 86 mètres. Un pont l'enjambe juste à l'aval du coude. La largeur et la profondeur sont de 6,40 mètres et 3,50 mètres pour le tronçon amont et de 4,40 mètres et 5,00 mètres pour le tronçon aval. Le dénivelé entre ses extrémités, de quatre mètres, autorise un débit de vingt mètres cubes par seconde. Ce débit, contrôlé par des vannes, peut être mesuré par un déversoir de Bazin (Figure 5.7). L'extrémité aval comporte des chambres de logement de turbines hydrauliques. L'origine du canal n'est pas bien connue : il aurait été creusé au début du XIX^e siècle, et il est indiqué sur une carte de 1847²⁸. Il a servi à une scierie puis à la papèterie Sirven. Le terrain comporte, outre le

²⁸ B. Brossard, *L'IMFT - Projet de restructuration du site*. Mémoire de fin d'études de l'École d'Architecture du Languedoc-Roussillon (1997) ; D. Aguerra, *Synoptique de l'histoire de l'IMFT* (2014). Arch. IMFT.

canal, deux bâtiments datant de 1875 (représentés sur la Figure 5.6). L'institut est autorisé à prélever sur le bras supérieur de la Garonne « le débit nécessaire au fonctionnement du laboratoire », prélèvement règlementé « afin de ne pas gêner le fonctionnement de l'Usine du Ramier ». Un avenant, l'année suivante, précise les conditions d'occupation.

Le terrain tarde cependant à être libéré par la Ville et par la société Sirven qui utilise toujours la turbine dans l'attente de la mise en service de l'usine hydroélectrique du Ramier juste en aval. L'opération n'est toujours pas réalisée en 1924, ainsi que le déplore Camichel :

[Le] locataire de la Ville, la Société Sirven, utilise encore le canal d'aménée qui alimente une usine génératrice fournissant de l'énergie à ses ateliers. Nous espérons que cette situation qui se prolonge depuis quatre ans va cesser puisque l'usine du Ramier qui a été commencée en 1915 est maintenant complètement terminée. Quelle que soit la solution envisagée pour son utilisation, elle fournira bientôt, conformément à l'article 4 de ladite convention, le courant nécessaire à l'usine Sirven et par conséquent le laboratoire de Banlève sera utilisable²⁹.

Un an plus tard, l'ingénieur de la Ville indique que l'opération « n'est plus que l'affaire de quelques mois. [...] M. Camichel recevra donc satisfaction sous peu³⁰ ». Les lieux sont enfin investis au cours de l'année 1926. Une des premières études, sur maquette à échelle réduite, porte sur le déversoir du barrage de Pinet sur le Tarn. Les Figures 5.8a et 5.8b illustrent une activité de mesure au-dessus du déversoir et une étude de l'écoulement autour d'un cylindre vertical. Les Figures 5.9a et 5.9b montrent les parties amont et aval du canal vers 1930, investies par des modèles réduits d'ouvrages hydrauliques.

²⁹ C. Camichel, *Rapp. UT 1923-1924*.

³⁰ Rapport de l'ingénieur de la Ville, 18 nov. 1925. Arch. municip. ING378.

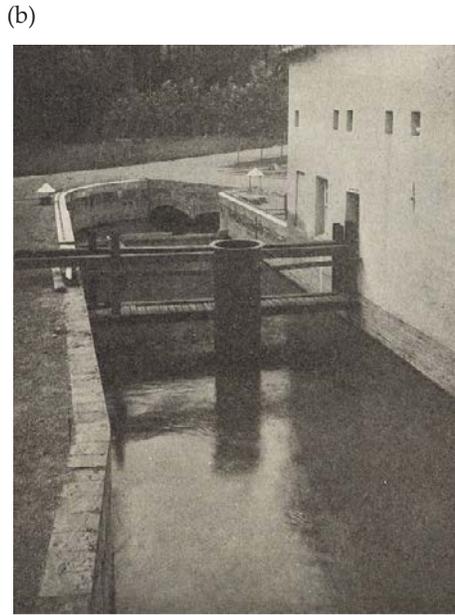
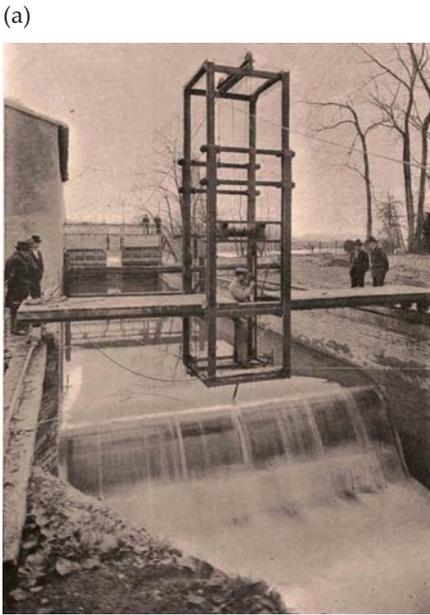


Figure 5.8 Canal courbe, partie amont : (a) regardé vers l'amont ; (b) regardé vers l'aval (le pont à deux arches est toujours en place en 2024).

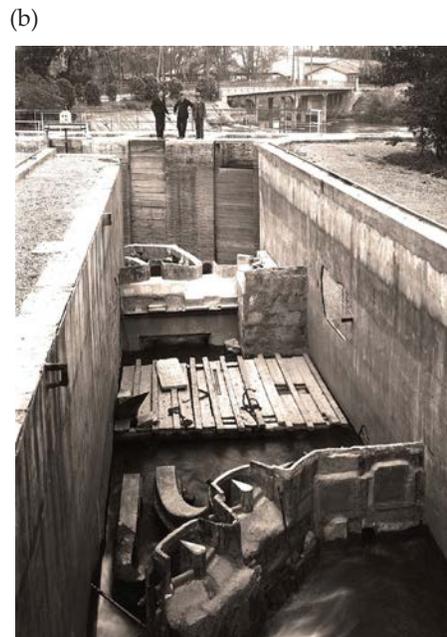


Figure 5.9 Canal courbe investi de modèles réduits d'ouvrages hydrauliques : (a) partie amont couverte vers 1930 ; (b) partie aval avec, à l'arrière-plan, le pont sur la chaussée de Banlève.

5.3.2. Un nouveau canal pour l'hydraulique fluviale

En 1924, Camichel est sollicité par le ministère des Travaux publics et la Société hydrotechnique de France (SHF) pour la réalisation d'études, sur modèles réduits, d'aménagement de basses chutes hydroélectriques. Il s'agirait en premier lieu du canal d'Alsace, entre le Rhin et le Rhône, où l'on cherche à concilier navigation et production d'électricité³¹. Ces études devaient initialement être entreprises au laboratoire de la SHF à Beauvert près de Grenoble. Mais le site de l'île du Ramier à Toulouse, « unique en France et à l'étranger », apparaît finalement préférable pour les débits importants qu'il permettrait. Un nouveau canal pourrait y être creusé entre les deux bras de la Garonne au fond du Parc toulousain, le long de la Poudrerie nationale occupant l'extrémité sud de l'île. Ce canal serait long de 550 mètres et large de 10 à 12 mètres. Camichel sollicite donc la Ville pour la cession d'une nouvelle parcelle du Parc toulousain, une bande de 550 mètres de long et 30 mètres de large. Le directeur de la poudrerie soulève cependant des objections liées aux servitudes imposées autour d'établissements « servant à la conservation, à la manipulation ou à la fabrication des poudres, munitions ou explosifs ». La Ville, initialement réticente, s'y déclare finalement favorable :

Il apparaît que la Ville de Toulouse ne doit pas laisser échapper l'occasion de favoriser la création de cette installation, car elle en retirera certainement un bénéfice moral incontestable et que, d'autre part, l'aide qu'on lui demande ne représente qu'un effort peu important qui ne nuirait en rien à l'aménagement du parc ni aux intérêts de la population.

À noter que pendant la période estivale, le canal d'étude pourrait jouer le rôle de piscine et devenir ainsi un des accessoires des organisations sportives [...]³².

³¹ *Rapp. UT 1924-1925* ; Arch. ENSEEIHT ; Arch. municip. 1R325-327.

³² *Rapport de l'ingénieur de la Ville, 18 nov. 1925*, Arch. municip. ING378.

Une délibération du conseil municipal, en avril 1926, autorise le maire à céder à l'université la bande de terrain demandée. En échange de cette cession, le terrain initialement concédé devrait être restitué à la Ville « sauf la partie située à l'intérieur de la clôture actuelle³³ ». Mais le directeur de la poudrerie persiste dans ses objections, et peut-être surgissent également des difficultés budgétaires. Le projet semble alors s'enliser.

Le nouveau canal. Le projet de grand canal abandonné, la question est désormais l'aménagement d'un canal plus modeste, dans les limites du terrain concédé en 1920. Il est envisagé dans un premier temps de redresser le canal existant par le creusement d'un prolongement, vers l'aval, de son tronçon amont ; une variante consisterait à prolonger vers l'amont le tronçon aval. Les demandes pressantes de Camichel peuvent susciter un certain agacement à la mairie : en marge d'une lettre de Camichel, le maire note ainsi, pour l'ingénieur de la Ville :

Je vous prie de bien vouloir me faire connaître votre avis sur cette affaire. Il y a intérêt à ce que cette question de Banlève soit réglée avec M. Camichel une bonne fois pour toutes sans quoi nous recevrons toutes sortes de demandes de sa part et nous ne verrons jamais venir la solution définitive³⁴.

Le projet finalement retenu est celui d'un nouveau canal laissant intact le premier, comme représenté sur le plan de la Figure 5.6. Mis en service en 1932, il est long de 117 mètres, large de 4 mètres et profond d'autant (Figure 5.10). Il autorise un débit de 25 m³/s, très supérieur à celui des autres laboratoires français. La fermeture des vannes amont et aval, commandées électriquement, permet de le transformer en bassin des carènes, notamment pour des essais de coques et flotteurs d'hydravions et pour le tarage des moulinets.

³³ Délibération du conseil municipal, 7 avr. 1926. Arch. ENSEEIHT.

³⁴ Lettre de Camichel au Maire, 11 mai 1927. Arch. municip.



Figure 5.10 Le canal droit mis en service en 1932 ; au fond, le chariot de traction de carènes ; à gauche, le terrain sur lequel sera édifiée la soufflerie. Arch. IMFT.

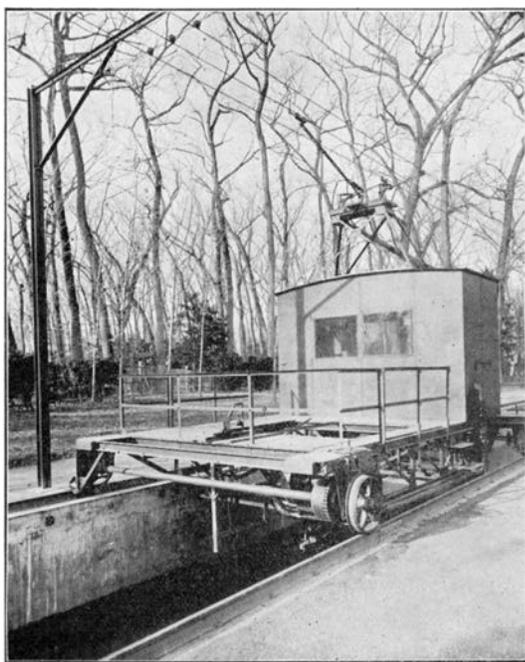


Figure 5.11 Chariot de traction de carènes. Arch. IMFT.

Le chariot de traction, sur rails, est financé par une subvention de 300 000 francs du ministère de l'Éducation nationale (Figure 5.11)³⁵.

Les études hydrauliques se diversifient : barrages de Puechabon sur l'Hérault et de Saint-Gaudens sur la Garonne, autres ouvrages dans les Hautes-Pyrénées, les Ardennes, les Côtes-du-Nord, le Jura, la Corrèze et l'Algérie³⁶.

³⁵ Le chariot est réalisé par l'entreprise E. Brondel (Lyon). Arch. nat. F17 14566, et conseil de l'université du 7 juill. 1933.

³⁶ C. Camichel, *Rapp. UT 1928-1929* ; Lévy-Leboyer & Morsel (1995, p. 434-437).

5.3.3. Rayonnement national et international

Les travaux engagés dans les années 1920 conduisent à cinq thèses de doctorat ès sciences. Trois de ces thèses, dans la continuité de celles de Eydoux (1919) et Foch (1920), portent sur l'hydraulique : écoulements au-dessus de déversoirs (Charles Ledoux, 1929 ; Charles Boujon, 1931), et similitude des écoulements et technique des modèles réduits (Léopold Escande, 1929). Les deux autres thèses correspondent à des travaux plus fondamentaux de mécanique des fluides (Pierre Dupin, 1930 ; Max Teissié-Solier, 1931)³⁷. Ils mettent en œuvre une expérimentation élaborée d'observation des allées de tourbillons à l'aval d'obstacles et de visualisation par chronophotographie rapide d'écoulements instationnaires (cf. chap. 7). Dupin reçoit en 1930 un prix 20 000 francs du ministère des Travaux publics pour l'invention d'un instrument électromécanique de mesure du débit.

Les travaux réalisés au laboratoire d'hydraulique sont régulièrement présentés par Camichel dans le cadre de conférences : à la Sorbonne dans la chaire de mécanique des fluides et applications³⁸, au Conservatoire national des Arts et Métiers (CNAM), ou à l'université de Barcelone. Camichel donne également une conférence générale au second congrès international de mécanique appliquée (ICAM), à Zurich en 1926. Il est alors l'un des dix savants invités à cette première manifestation scientifique où Français et Allemands consentent à se retrouver après les années de tension de l'après-guerre – Émile Jouguet est l'autre Français invité. À sa conférence *Sur la suppression dans les conduites*, Camichel ajoute une communication *Sur la méthode chronophotographique de mesure des vitesses*. Le rapport annuel du conseil de l'université de Toulouse rend compte de ce congrès par la voix d'un second participant toulousain, Adolphe Buhl (1878-1949), astronome et professeur de mathématiques générales (1910-1920) puis de calcul différentiel et intégral (1921-1945) à la faculté des sciences, lui-même auteur

³⁷ Cf. Annexe A.

³⁸ Les *Leçons sur les conduites* qu'il y professe sont éditées (Camichel, 1930).

d'une communication *Sur les origines stokesiennes de la Cinématique*. Buhl y déplore la faiblesse de la représentation française : « Il n'y avait pas dix Français et peut-être cent cinquante Allemands³⁹ ». Notons ici qu'en 1929, Tullio Levi-Civita, mathématicien à l'université de Rome et théoricien de la mécanique des fluides, est distingué *Docteur honoris causa* lors des célébrations du septième centenaire de l'université de Toulouse.

En 1929, le ministère de l'Air récemment créé choisit Toulouse pour l'implantation d'un institut de mécanique des fluides. Une nouvelle histoire s'ouvre, objet du chapitre suivant.

³⁹ A. Buhl, *Rapp. UT 1925-1926*. Parmi les participants français : Barrillon, Bénard, Bouligand, Buhl, Camichel, Hahn, Jouguet, Kampé de Fériet et Risser (lettre de J. Kampé de Fériet à A. Châtelet, du 28 sept. 1926. Arch. dép. Pas-de-Calais, 81J1, fonds Châtelet). Pour une recension du congrès : Pöschl (1926).

Chapitre 6

L'institut de mécanique des fluides

Les quatre vieux éléments des anciens nous appartiennent désormais. L'homme a eu d'abord la terre, puis il a pris l'eau, voilà enfin qu'il saisit l'air. Quant au feu, il est en nous, c'est la pensée.

Victor Hugo, *Lettre à Nadar*, 1864

La création en 1930 de l'institut de mécanique des fluides de Toulouse (IMFT), à l'instigation du ministère de l'Air, s'inscrit dans un mouvement de reprise en main par l'État français du développement de l'aéronautique nationale¹. La première section du chapitre situe le contexte industriel et universitaire. Les suivantes présentent les conditions de la création de l'IMFT et les étapes de son développement (§ 2), la mise en service de sa soufflerie aérodynamique en 1936 (§ 3), et enfin les années de guerre (§ 4).

6.1. Contexte national

6.1.1. Les débuts de l'aéronautique française (1905-1928)

La première décennie du xx^e siècle voit l'accomplissement d'un rêve millénaire de l'humanité, celui de voler dans les airs. Les premiers vols pilotés sont réalisés en 1903 et 1904

¹ Pour une présentation plus générale du contexte aéronautique et de la création des instituts de mécanique des fluides, cf. Charru (2021).

aux États-Unis par les frères Wright, avec leur aéroplane *Flyer*. En France, un événement marquant est le vol réalisé le 13 janvier 1908 par Henry Farman, sur un avion construit par les frères Gabriel et Charles Voisin². Farman réalise ce jour-là une boucle de 1500 mètres au-dessus du champ de manœuvres d'Issy-les-Moulineaux, au sud-ouest de Paris, remportant ainsi un prix offert par deux mécènes co-fondateurs de l'Aéroclub de France : Henry Deutsch de la Meurthe, industriel du pétrole, et Ernest Archdeacon, avocat d'origine irlandaise. L'événement est largement relayé par la presse.

Quelques mois plus tard, les frères Wright viennent en France pour une campagne promotionnelle de démonstrations. Le mathématicien et député Paul Painlevé réalise avec eux son baptême de l'air. Enthousiasmé, il devient un ardent prosélyte de l'aviation auprès des milieux parlementaires³. De nombreux ateliers de construction apparaissent où des inventeurs-constructeurs soutenus par un généreux mécénat rivalisent d'ingéniosité et d'audace. Les progrès sont fulgurants, chaque semaine amenant un nouveau record de durée de vol ou d'altitude ou de vitesse. Des meetings aériens rassemblent un public enthousiaste, de nombreuses revues spécialisées fleurissent pour satisfaire sa curiosité.

La Première Guerre mondiale consacre l'aviation comme nouvelle arme à part entière. Différentes missions sont définies, d'observation, d'attaque ou de défense, et les appareils se spécialisent en chasseurs, bombardiers ou appareils de reconnaissance. Painlevé, ministre de l'Instruction publique, crée une direction des inventions destinée à promouvoir les innovations notamment dans le domaine de l'aéronautique.

La paix revenue, l'industrie aéronautique – qui emploie 150 000 personnes en 1918 – doit affronter la question de sa reconversion vers des activités civiles⁴. Le transport aérien des personnes et des marchandises apparaît alors comme un nouvel horizon. L'État, pour qui l'aéronautique représente désormais un enjeu stratégique, crée en 1919 un sous-secrétariat à l'Aéronautique et aux Transports aériens. La production demeure

² Chadeau (1987, chap. 1).

³ Fontanon (2005).

⁴ Chadeau (1987, chap. 5).

cependant artisanale et dispersée sur de multiples constructeurs. Cette forme d'organisation, propice aux pionniers, se montre maintenant inadaptée et les performances des appareils sont dépassées par la concurrence étrangère – allemande, anglaise et italienne. Parmi les objectifs d'André Laurent-Eynac, à la tête du sous-secrétariat, figure celui de stimuler la collaboration des universitaires avec l'industrie, par la création de nouveaux enseignements et de laboratoires de recherche. Quelques structures existent déjà, qu'il s'agit de renforcer.

6.1.2. Premières institutions pour l'aérodynamique

Les premières recherches françaises liées à l'aéronautique sont l'œuvre non pas de laboratoires universitaires, mais d'un célèbre ingénieur, Gustave Eiffel (1832-1923). Après une glorieuse carrière consacrée à la conception et à la construction de nombreux ouvrages de génie civil, ponts et viaducs, Eiffel, éclaboussé par le scandale du canal de Panama (pour lequel il a réalisé les écluses), décide de quitter les affaires. À l'âge de soixante ans, il s'engage dans une nouvelle carrière dédiée à une question qui le préoccupe depuis longtemps, celle de la résistance au vent. Il installe, dans la tour du Champ-de-Mars, un laboratoire pour l'étude de la résistance à l'avancement d'objets de formes diverses (sphères, cylindres, plans). Ces objets, lâchés du deuxième étage à 115 mètres de hauteur, sont guidés par un câble tendu verticalement et accompagnés dans leur chute par une cage contenant l'instrumentation.

En 1909, Eiffel installe au pied de la tour un laboratoire fermé, afin de s'affranchir des aléas météorologiques. Il ne s'agit plus d'étudier un corps tombant dans de l'air immobile, mais de la situation inverse d'un corps immobile dans le courant créé par un ventilateur. Il s'est renseigné auprès d'une grande autorité scientifique, Henri Poincaré, sur l'équivalence des deux situations du point de vue des forces aérodynamiques sur l'objet. La « soufflerie » qu'il construit – plutôt un aspirateur – comporte trois parties : un collecteur (conduit convergent) où l'air ambiant est accéléré, une chambre où la veine d'air à grande vitesse rencontre l'obstacle étudié, et une buse à la sortie de laquelle se trouve le ventilateur. En 1912, un

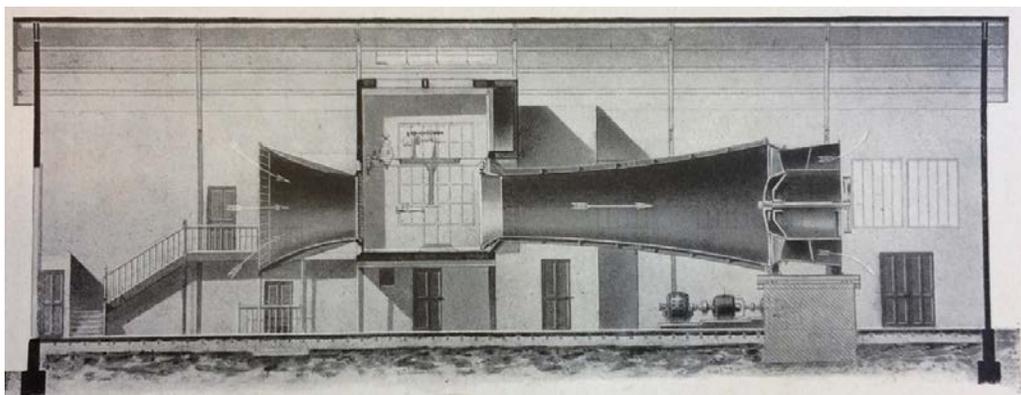


Figure 6.1 Soufflerie d’Auteuil mise en service en 1912 ; l’air, aspiré par le ventilateur (à droite), est accéléré dans le collecteur (à gauche), traverse la chambre d’expériences, puis est ralenti dans le long diffuseur ; la longueur de l’installation est de 20 mètres (Eiffel, 1914).

nouveau laboratoire est construit à Auteuil, à l’ouest de Paris, équipé de souffleries plus puissantes et plus performantes (Figure 6.1). Comparées aux souffleries qui se construisent dans les mêmes années à l’étranger, celles d’Eiffel comportent deux innovations importantes. La première, déjà présente au Champ-de-Mars, est que la veine d’air autour de l’obstacle n’est pas confinée latéralement mais ouverte dans une vaste chambre ; l’installation de l’instrumentation – des tubes de Pitot pour la mesure de la vitesse du vent et des balances de mesure des forces sur l’obstacle – s’en trouve grandement facilitée. La seconde innovation, brevetée en 1911, est un long conduit interposé entre cette chambre et le ventilateur – un « diffuseur » –, réalisant une augmentation de section qui diminue considérablement, à débit égal, la puissance nécessaire à l’entraînement du ventilateur. Eiffel et ses assistants Léon Rith et Antonin Lapresle offrent désormais leurs services aux constructeurs aéronautiques, pour des essais de profils d’ailes ou d’appareils complets à échelle réduite.

Eiffel réalise un nombre considérable d’essais – plus de 4000 entre 1909 et 1912 – dont les résultats sont publiés dans des ouvrages largement diffusés et traduits à l’étranger. Il découvre notamment, en 1912, un remarquable phénomène de mécanique des fluides : au-delà d’une certaine vitesse de l’air, la résistance de traînée

sur un obstacle sphérique chute brutalement⁵. Ludwig Prandtl (1875-1953), qui dirige à Göttingen un laboratoire d'aérodynamique réputé, est intrigué par cette découverte et rend visite à Eiffel quelques semaines plus tard. Convaincu par Eiffel de la réalité du phénomène, il en trouve une explication fondée sur la transition à la turbulence d'une « couche limite » à la surface de l'obstacle, couche limite dont il est le théoricien. Cette « crise de traînée » s'avèrera être un phénomène d'une grande portée générale, intervenant dans toute question relative à la résistance à l'avancement.

Deux autres initiatives remarquables de mécènes privés installent l'aérodynamique dans le cadre universitaire. La première est la création en 1909 d'une chaire d'Aviation à l'université de Paris, fondée par Basil Zaharoff, marchand d'armes international et personnalité flamboyante et quelque peu sulfureuse⁶. Lucien Marchis, physicien, est le premier titulaire de cette chaire. Passionné de technique aéronautique, il fait ouvrir par la faculté des sciences un certificat d'études supérieures (CES) dans cette spécialité. La seconde initiative est la création, la même année, d'un institut aérotechnique à Saint-Cyr-l'École, fondé par Henry Deutsch de la Meurthe et rattaché à l'université de Paris. Le premier directeur de cet institut est Charles Maurain, professeur de physique à la faculté. Cet institut comprend notamment une voie ferrée de 1300 mètres sur laquelle sont tractés les profils d'ailes à étudier. En 1920, Maurain, physicien éclectique, part fonder l'institut de physique du globe de Paris et laisse l'institut aérotechnique à son assistant Albert Toussaint.

Ces premières réalisations en faveur de la recherche aéronautique – laboratoires d'Eiffel, chaire d'Aviation, institut de Saint-Cyr – sont donc le fait d'initiatives privées. Ce n'est que dans les années 1920 que l'État, sous l'impulsion de Painlevé, s'engage à son tour. L'initiative en revient au sous-secrétariat à l'Aéronautique (et non à l'Instruction publique) qui fonde en 1923, à la Sorbonne, une chaire de mécanique des fluides et applications. La chaire est confiée à Painlevé lui-même. Celui-ci attache à son service un ingénieur, Dimitri Riabouchinsky (1882-1962), immigré russe fondateur en 1904 d'un

⁵ Eiffel (1912).

⁶ Gaston-Breton (2019).

institut aérotechnique réputé à Koutchino près de Moscou – Riabouchinsky sera élu correspondant de l'Académie des sciences en 1935.

Painlevé, très occupé par de nombreuses activités politiques et universitaires – il est titulaire de deux autres chaires –, quitte la chaire de mécanique des fluides en 1927. Celle-ci revient alors à un mathématicien réputé, Henri Villat (1879-1972).

6.1.3. Une politique nationale pour la mécanique des fluides

La direction technique et industrielle du ministère de l'Air. Les enjeux stratégiques liés à l'aéronautique, la difficulté persistante de son industrie à s'organiser efficacement, et la menace d'une remilitarisation de l'Allemagne, amènent l'État français à la création, en 1928, d'un ministère de l'Air, confié à Laurent-Eynac. Les questions techniques et industrielles sont déléguées à une direction confiée à un ingénieur polytechnicien d'envergure, Albert Caquot⁷. Celui-ci s'est illustré pendant la Première Guerre mondiale par sa conception d'un nouveau type d'aérostat (ballon d'observation tenu au sol par des câbles), capable de résister à des vents importants ; puis il a dirigé la section technique de l'Aéronautique militaire, résolvant personnellement de nombreux problèmes de moteurs et d'hélices. La paix revenue, il a poursuivi sa carrière dans le génie civil où il est devenu l'un des meilleurs spécialistes des ouvrages en béton armé.

Au sein de la puissante direction technique et industrielle dont il prend la tête en 1928, Caquot va déployer une énergie considérable sur plusieurs niveaux. Vis-à-vis de l'industrie, il lance une « politique des prototypes » consistant à encourager la conception de nouveaux avions performants, et s'attache à réorganiser la profession en favorisant les regroupements et la rationalisation de la production. Il fait édifier par ailleurs une « Cité de l'Air », boulevard Victor, où sont rassemblés les services du ministère, un service des recherches (SRAé) doté de moyens importants, l'École de l'aéronautique et des constructions mécaniques – école fondée en 1909 qu'il nationalise –, et un musée de l'Air. Cette cité est

⁷ Chadeau (1987, p. 162-169) ; Kerisel (2001).

mitoyenne d'un ancien champ de manœuvres militaires où s'est installé l'Établissement d'expériences techniques d'Issy-les-Moulineaux (EETIM), établissement regroupant les laboratoires des services techniques de l'Aéronautique de l'État. Une soufflerie géante, où pourront être testés des avions en grandeur réelle, est mise en chantier à Chalais-Meudon et inaugurée en 1935 (la seule soufflerie de ce type alors existante, aux États-Unis, a été mise en service l'année précédente). Enfin, Caquot propose aux universités un programme ambitieux de développement de l'enseignement et de la recherche académique, à travers la création d'instituts de mécanique des fluides⁸.

Les instituts de mécanique des fluides et les centres annexes d'enseignement. Des contacts avec les recteurs et doyens des facultés des sciences sont pris dès la fin de l'année 1928 par Caquot lui-même et ses deux associés : l'inspecteur général Seguin, directeur du service des recherches de l'Aéronautique (SRAé), et Jean Villey, maître de conférences de mécanique physique à la faculté des sciences de Paris. Les négociations sont rondement menées et quatre instituts de mécanique des fluides (instituts d'université) sont créés entre l'automne 1929 et le printemps 1930, à Paris, Lille, Marseille et Toulouse. L'institut parisien est doté de deux nouvelles chaires – de mécanique des fluides théorique (Henri Villat) et de mécanique des fluides expérimentale (Henri Bénard) – et de trois maîtrises de conférences. Villat en est nommé directeur et Riabouchinsky directeur-adjoint. Chacun des instituts de province est doté d'une chaire ou d'une maîtrise de conférences transformable ultérieurement en chaire. Des emplois d'assistant ou d'ingénieur leur sont associés. L'invitation de chercheurs étrangers est encouragée par le financement de conférences. Le ministère de l'Air finance par ailleurs des « collaborateurs scientifiques » sur des projets contractuels, permettant à nombre de ces collaborateurs la préparation d'une thèse de doctorat ès sciences. L'esprit des collaborations est très ouvert :

Les sujets pourront en être choisis dans un esprit très large : elles visent à l'obtention de tout progrès intéressant dans les divers domaines des applications

⁸ Charru (2021, chap. 4).

aéronautiques, même si l'échéance n'en apparaît que lointaine⁹.

Une nouvelle collection de *Publications scientifiques et techniques du ministère de l'Air*, accueille dans les années suivantes les travaux réalisés sous l'égide du ministère et notamment les thèses de doctorat. Enfin, d'importantes subventions sont accordées pour l'édification, sur des terrains universitaires, de bâtiments et de souffleries. À Paris où de tels terrains s'avèrent difficiles à trouver, Caquot cède des locaux de son ministère, rue de la Porte d'Issy, pour l'installation du laboratoire de Bénard.

En plus des quatre instituts, cinq centres annexes d'enseignement sont créés à Strasbourg, Poitiers, Nantes, Caen et Lyon, sans création de chaire mais avec le financement de cours complémentaires et de collaborateurs scientifiques. Les facultés concernées doivent créer un certificat de mécanique des fluides dont le programme, national, comprend trois parties d'égale importance : théorique, expérimentale, et technique. Un concours annuel est organisé pour tous les candidats au certificat et des prix sont décernés aux meilleurs étudiants.

Ce généreux programme sera maintenu tout au long des années 1930 en dépit de la crise économique et des restrictions budgétaires. L'arrivée en 1934 d'un nouveau ministre de l'Air, peu favorable à la recherche scientifique, entraîne la démission de Caquot, mais l'opiniâtreté de Villey permettra le maintien du programme général à un bon niveau, et permettra surtout le maintien du financement des emplois créés dans les universités.

Le Groupement pour les recherches aéronautiques (GRA). En 1936, les sociétés de construction aéronautiques, qui souffrent toujours d'une dispersion de leurs moyens et de performances techniques médiocres, sont nationalisées par le Front populaire et structurées en cinq sociétés nationales (SNCA), chacune basée sur une région du territoire national. Une sixième société, la SNCA du Midi, est créée l'année suivante autour du constructeur Émile Dewoitine basé à Toulouse¹⁰.

⁹ Lettre du directeur du SRAé aux doyens des facultés des sciences (21 pages avec les trois notes jointes), 26 juin 1929. Arch. nat. AJ16 5775.

¹⁰ Chadeau (1987, chap. 7). À ces six sociétés, s'ajoute une société de construction de moteurs, la SNCM, future SNECMA.

Deux années plus tard, ces sociétés décident de coordonner leurs recherches dans le cadre d'une fondation placée sous l'égide du ministère de l'Air, le Groupement français pour le développement des recherches aéronautiques (GRA)¹¹. Cet organisme est désormais l'interlocuteur principal des instituts de mécanique des fluides, et l'ordonnateur quasi-exclusif de leurs travaux contractuels. Soucieux avant tout d'efficacité à court terme, le GRA réoriente les collaborations, en nombre décroissant depuis le départ de Caquot, vers des programmes essentiellement techniques. L'institut de Lille, en particulier, que son directeur Joseph Kampé de Fériet et son adjoint André Martinot-Lagarde ont amené à un niveau scientifique et technique élevé¹², se trouve victime de son succès : peu soutenu par la faculté des sciences, il passe sous la gérance directe du GRA.

Quelques mois plus tard, l'imminence de la guerre et l'urgence de mettre en ordre de marche l'aviation militaire, incitent le ministre de l'Air à rappeler Caquot. Celui-ci – élu entretemps membre de l'Académie des sciences – se voit également confier la présidence des six sociétés nationales. La production aéronautique décolle enfin, mais trop tard pour permettre à l'aviation française, à la déclaration de guerre en septembre 1939, de pouvoir s'imposer face à sa rivale allemande.

6.2. L'institut de mécanique des fluides de Toulouse

6.2.1. Contexte aéronautique régional

L'industrie aéronautique toulousaine naît en 1918 lorsqu'un fabricant de matériel ferroviaire, Pierre-Georges Latécoère, bien introduit auprès du milieu politique radical-socialiste, obtient le marché du montage en sous-traitance de mille avions de reconnaissance biplaces Salmson. L'entreprise étant novice dans le domaine aéronautique, l'administration lui affecte un ingénieur issu

¹¹ Décret de création du 14 févr. 1938. Arch. IMFL, ONERA Lille.

¹² Demuro (2017) ; Charru (2021, chap. 6).

de l'École Breguet, Émile Dewoitine. La paix revenue, Latécoère inaugure des liaisons commerciales vers l'Espagne puis vers le Maroc et le Sénégal. Sa société devient en 1927 la Compagnie générale aéro postale, où s'illustre notamment Jean Mermoz (qui réalise en 1930 la première liaison postale vers l'Amérique du Sud) et Antoine de Saint-Exupéry. Les exploits des pilotes de L'Aéro postale n'empêcheront pas celle-ci de succomber à de graves difficultés financières, et d'être finalement absorbée en 1933 dans la nouvelle compagnie nationale Air France. Latécoère se lance également dans les années 1920 dans la construction d'hydravions, appareils alors considérés comme l'avenir de l'aviation commerciale. Latécoère en devient un spécialiste¹³. Des liaisons transatlantiques vers les Antilles et New York, à partir de l'étang de Biscarosse dans les Landes, sont ainsi mises en service dans les années 1930. Les contraintes liées à ce type d'appareils (peu aérodynamiques, et exigeant pour leur décollage et amerrissage un plan d'eau calme) conduiront à leur abandon après la Seconde Guerre mondiale, sauf pour des missions spécifiques.

Le second constructeur toulousain de l'entre-deux-guerres est Émile Dewoitine. Initialement recruté comme ingénieur par Latécoère, il fonde en 1920 son propre bureau d'études puis une usine de fabrication. Sa société, au bord de la faillite en 1937, est alors absorbée dans la SNCA du Midi – nationalisation que Latécoère, de son côté, refusera toujours. Ces deux constructeurs seront, à partir de 1938, les principaux clients industriels de la soufflerie aérodynamique de l'institut de mécanique des fluides – le Dewoitine D520 qui y est étudié est, à l'entrée en guerre, le meilleur chasseur de l'aviation française.

6.2.2. Création de l'institut

Négociations avec le ministère de l'Air. Les premiers contacts entre le ministère de l'Air et l'université de Toulouse sont noués début mai 1929 lors d'une visite à Toulouse du directeur du service des recherches de l'Aéronautique, l'inspecteur général Seguin¹⁴. Deux semaines

¹³ Boisson & Crausse (2014, p. 63-67).

¹⁴ Lettre de Seguin au recteur, 4 mai 1929 ; visite à Toulouse le 10 mai. Arch. dép. de la Haute-Garonne (AD31) 2559 162.

plus tard, le recteur reçoit d'Albert Caquot la lettre de cadrage de la collaboration envisagée, qu'il transmet pour avis au doyen de la faculté des sciences – lettre également envoyée à toutes les universités de province pressenties¹⁵. Une commission d'examen des propositions de l'Air, à la faculté, se prononce favorablement sur la création d'un institut de mécanique des fluides mais y met toutefois certaines conditions. Après avoir souligné l'importance des contributions locales au laboratoire d'hydraulique existant – qui serait intégré du nouvel institut –, elle demande la création non pas d'un seul, mais de deux emplois : une maîtrise de conférences de mécanique des fluides et un poste de mécanicien. Le rapport de la commission, adopté à l'unanimité par l'assemblée générale de la faculté, conclut ainsi :

En invoquant les termes mêmes de la lettre ministérielle, la Faculté demande donc que le ministère de l'Air fasse, dès maintenant, les créations permanentes suivantes :

1. Un cours annuel de Mécanique des Milieux Continus qui serait confié à M. le Professeur Roy [titulaire de la chaire de mécanique rationnelle].
2. Une maîtrise de Conférences de Mécanique des Fluides, transformable en chaire, dans les conditions indiquées par la lettre ministérielle, qui serait attribuée à M. Escande, Docteur ès Sciences. Ces deux enseignements permettraient à la Faculté des Sciences, après l'acceptation par le ministère de l'Air de la présente demande, la création d'un Certificat d'études supérieures de Mécanique des Fluides, dont tous les éléments au point de vue de l'organisation des travaux pratiques, existent déjà à l'Institut électrotechnique et dans ses annexes.
3. Un poste de Mécanicien principal, attaché au laboratoire de Mécanique des Fluides. Ce poste serait confié à M. Raymond Rieu, conducteur Électricien Mécanicien de l'Université de Toulouse, et serait assimilé, au point de vue du traitement et de l'avancement, à celui de Professeur technique.
4. En outre, le laboratoire de Mécanique des Fluides de l'Institut Électrotechnique serait transformé en

¹⁵ Circulaire de Caquot aux recteurs d'université, du 22 mai 1929. AD31, 2559 162.

un Institut autonome de Mécanique des Fluides dont la Direction serait confiée à M. Camichel¹⁶.

Le conseil de l'université, saisi à son tour, approuve les demandes de la faculté. Début novembre, Caquot précise ses propositions. Il y exprime en préambule la nécessaire coordination entre les activités hydrauliques et aéronautiques :

L'Institut serait créé, ainsi que les emplois nouveaux qu'il comporte, par l'Université de Toulouse qui y grouperait les installations hydrauliques dont elle assure le fonctionnement avec le concours du ministère des Travaux Publics, et les installations et enseignement généraux de Mécanique des Fluides (orientés vers les applications aérodynamiques) qu'elle réaliserait avec l'aide du ministère de l'Air. Les liens profonds qui existent entre les diverses branches de la mécanique des fluides rendent cette coordination intime éminemment désirable¹⁷.

Il indique ensuite que la subvention annuelle versée par le ministère de l'Air serait égale au traitement moyen d'un professeur – comme pour les autres instituts de province. Vient ensuite la question de la direction :

La Direction de l'Institut serait confiée, conformément aux propositions de la Faculté, à Monsieur Camichel. Il serait du plus haut intérêt, à ce sujet, que le titre de sa chaire pût être transformé et devenir « Mécanique des Fluides » ou, à tout le moins, contenir cette appellation. Cette mesure [...] réaliserait cette condition nécessaire que l'Institut comporte une chaire.

Ce point ne présentera pas de difficulté, et la Ville, qui voit le projet d'un bon œil, donne rapidement son accord pour l'intitulé « électricité industrielle et mécanique des fluides »¹⁸. Puis Caquot en vient à la question plus délicate

¹⁶ Assemblée générale de la faculté des sciences, 19 juin 1929. AD31, 2559 162.

¹⁷ A. Caquot au recteur, 5 nov. 1929. Arch. ENSEEIHT, AD31, 2559 162.

¹⁸ C. Camichel au doyen, 28 nov. 1929 ; conseil de la faculté, 4 déc. 1929 ; décret du 2 févr. 1930. AD31, 2559 162, et Arch. ENSEEIHT.

des emplois, où il s'en tient à sa proposition initiale de création d'un seul emploi de chef des travaux :

L'Université de Toulouse créerait un emploi de Chef de Travaux chargé de conférences, qu'elle s'engagerait à transformer ultérieurement en maîtrise de conférences [...].

L'Université de Toulouse assurerait d'autre part, par des cours supplémentaires, la partie mathématique de l'enseignement correspondant au certificat de Mécanique des Fluides.

Les fonctions d'assistant seraient remplies par un collaborateur scientifique du Service des Recherches [...]. Cette disposition, en évitant à l'Université la charge d'un traitement d'assistant, lui faciliterait la création d'un emploi de mécanicien demandé par la Faculté des Sciences. [...]

Enfin des contributions locales importantes seraient à obtenir, non seulement pour ce qui concerne les laboratoires hydrauliques, mais aussi pour les recherches et expériences aérodynamiques.

En réponse, la faculté rappelle que les contributions locales pour la mécanique des fluides sont déjà très importantes, avec notamment la chaire municipale. Et elle déclare ne pas désirer, finalement, la création d'un nouvel institut. Cette rétractation est motivée par « des raisons d'administration », afin que les enseignements de mécanique des fluides restent organisés par la faculté et non au sein d'un nouvel institut¹⁹. Il est vraisemblable qu'une autre motivation de ce revirement est la crainte de Camichel que le ministère des Travaux publics prenne ombrage de la création, par l'Air, d'un institut absorbant le laboratoire d'hydraulique qu'il a largement contribué à créer²⁰.

Mais Caquot tient fermement à la création d'un institut de mécanique des fluides :

Je crois devoir vous signaler, déclare-t-il au recteur, l'importance de cette condition. Elle figure explicitement dans les accords de principe convenus entre les ministères de l'Air, de l'Instruction Publique et des Finances,

¹⁹ Le recteur à A. Caquot, 28 déc. 1929 ; Le recteur au directeur de l'Enseignement supérieur, 28 déc. 1929. AD31, 2559 162.

²⁰ C. Camichel au doyen, 28 nov. 1929. AD31, 2559 162.

et dans les rapports des Commissions du Budget [...] Aucune difficulté n'a été rencontrée dans les créations, déjà réalisées, des Instituts de Mécanique des Fluides de Lille et de l'Université de Paris et je vous serais reconnaissant de bien vouloir me faire connaître si des circonstances particulières feraient obstacle à l'adoption à Toulouse de la formule qui y a été mise en application, et qui répond très bien aux buts poursuivis²¹.

Camichel et la faculté cèdent sur la question d'un nouvel institut, tandis que Caquot cède sur celle des emplois. Le poste créé sera une maîtrise de conférences, « brûlant la première étape prévue » dira Villey, et la subvention inclura le traitement d'un poste de mécanicien créé par l'université.

Le compromis scellé, le ministère de l'Air attribue en février 1930 une subvention de 12 250 francs à l'université de Toulouse, pour le premier trimestre de l'année (somme représentant le quart de la subvention annuelle prévue)²². L'institut est officiellement créé par un décret du 30 novembre 1930. Un règlement intérieur est annexé au décret.

6.2.3. L'IMFT dans les années 1930

Mise en route de l'institut. Le personnel de l'institut comprend initialement cinq personnes :

- un directeur, professeur à la faculté des sciences (Charles Camichel) ;
- un professeur chargé du cours de mécanique des fluides théorique (Louis Roy, titulaire de la chaire de mécanique rationnelle) ;
- un maître de conférences de mécanique des fluides (Léopold Escande, ingénieur IET, docteur ès sciences) ;
- un collaborateur scientifique extérieur du ministère de l'Air, faisant fonction d'assistant et désigné sous le nom d'« ingénieur de l'institut » (Jean Baubiach, ingénieur de l'IET et de l'École supérieure d'électricité, antérieurement préparateur temporaire à l'IET) ;

²¹ A. Caquot au recteur, 13 janv. 1930. AD31, 2559 162.

²² Arrêté minist. du 15 févr. 1930. AD31, 2559 162.

- un mécanicien chargé du montage des travaux pratiques (Raymond Rieu, conducteur électricien-mécanicien de l'IET).

Louis Roy (1882-1959), membre correspondant de l'Académie des sciences depuis 1927, ne participera pas réellement à l'activité de l'institut en dehors de sa charge d'enseignement, et poursuivra ses recherches sur l'astronomie²³.

Un chercheur supplémentaire, Étienne Crausse, ingénieur IET, rejoint l'institut en novembre en tant que préparateur temporaire puis chargé de conférences à l'IET. Il entreprend une thèse sur les phénomènes transitoires en mécanique des fluides et bénéficie, à partir de 1932, d'une bourse de chargé de recherches de la Caisse nationale des sciences (CNS), renouvelée chaque année jusqu'en 1936.

Jean Baubiac, ingénieur de l'institut, se voit préciser son sujet de thèse par le service des recherches de l'Aéronautique :

Vous poursuivrez, sous la direction de M. Camichel, au Laboratoire de l'Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse, des recherches expérimentales sur le sillage des corps immergés qui constituent le sujet de votre thèse d'Ingénieur Docteur. À ces recherches vous vous engagez à consacrer toute votre activité²⁴.

Caquot précise qu'il s'agit bien d'une collaboration temporaire :

Mon désir, marqué par cette appellation même, est de voir se succéder, dans ces fonctions, des candidats au Doctorat ou au diplôme d'Ingénieur-docteur, qui aillent ensuite apporter, dans les industries aéronautiques, les habitudes de méthode scientifique qu'ils y auront acquises.

La subvention du ministère de l'Air comporte finalement trois parties :

- une subvention annuelle de 49 000 francs, couvrant l'indemnité versée à Roy (3 000 francs) et les traitements des emplois créés de maître de conférences et de mécanicien (34 000 francs et 8 000 francs, respectivement) ;

²³ Arch. Acad. Sc., dossier L. Roy.

²⁴ A. Caquot au recteur, 23 févr. 1931. AD31, 2559 162.

- une « subvention indirecte » correspondant au traitement d'un collaborateur scientifique faisant fonction d'assistant, à la charge du service des recherches de l'Aéronautique, évaluée à 17 000 francs (coût d'un assistant) ;
- « des subventions variables pour exécution des recherches ».

La partie récurrente de la subvention sera ensuite fixée à 70 000 francs, montant identique à celui des deux autres instituts de province, et maintenu à peu près constant au cours de la décennie.

Un conseil d'administration de l'institut est constitué. Présidé par le recteur, il comprend, outre des représentants des institutions de tutelle, le directeur du service des Forces hydrauliques du Sud-Ouest (ingénieur en chef des Ponts et Chaussées) et le directeur des Établissements Latécoère. S'y ajouteront l'année suivante un représentant du ministère de l'Air – Caquot, initialement oublié ! – et les directeurs des observatoires de Toulouse (Eugène Cosserat puis Émile Paloque à partir de 1931) et du pic du Midi (Camille Dauzère puis Jules Baillaud à partir de 1937)²⁵.

Enseignement. Anticipant la création des nouveaux enseignements, Camichel organise dès le mois de novembre 1929 un cours de mécanique des fluides, suivi « par vingt élèves »²⁶. Au mois de mars suivant, le ministère de l'Instruction publique autorise la faculté des sciences à délivrer un certificat d'études supérieures (CES) de mécanique des fluides et à créer une mention « mécanique des fluides » du diplôme d'ingénieur mécanicien²⁷.

Le nouveau certificat comporte 75 leçons et 20 séances de travaux pratiques répondant à un programme minimum commun à tous les instituts, arrêté par un Comité d'enseignement de la mécanique des fluides et soumis à l'agrément du ministre de l'Air. Le cours de mécanique théorique des fluides, inauguré le 7 mars, est donné par Roy, la mécanique expérimentale des fluides est enseignée par Escande et les travaux pratiques sont encadrés

²⁵ Sur Cosserat, cf. Hiriart-Urruty & Spiesser (2021) ; sur Dauzère et Baillaud, cf. Davoust (2000, p. 238-239).

²⁶ C. Camichel au doyen, 28 nov. 1929. AD31, 2559 162.

²⁷ C. Camichel, *Rapp. UT 1929-1930*. Arrêtés minist. du 15 mars et du 26 juin 1930. Arch. ENSEEIHT.

par Rieu. Ces cours sont suivis par les étudiants inscrits au certificat ainsi que par les élèves-ingénieurs candidats à la mention mécanique des fluides du diplôme d'ingénieur mécanicien. Le certificat ne sera décerné qu'à une dizaine d'étudiants au cours de la décennie, soit un certificat par année en moyenne – le score du certificat d'électricité industrielle est alors à peine meilleur. Son succès s'amplifiera nettement après la guerre avec une quinzaine de diplômés par année.

Évolutions au cours de la décennie. En 1934, un second collaborateur scientifique, faisant fonction d'assistant, est affecté à l'institut pour les études de coques d'hydravions. Georges Sabathé, l'ingénieur IET retenu, a pour mission d'étudier « les mouvements fluides provoqués par les redans dans les coques d'hydravions »²⁸. Il étudiera notamment, dans le canal droit de Banlève, le Laté 631, fleuron de Latécoère (Figure 6.2). De 1932 à 1937, Sabathé publie dix notes dans les *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, dont une en seul auteur²⁹ et les autres en collaboration avec Escande et Camichel. Arrive également en 1934 Louis Castex (1913-1986), ingénieur IET, qui prend bientôt la direction technique des laboratoires de Banlève³⁰.

Crausse soutient sa thèse de doctorat ès sciences en octobre 1936 et quitte aussitôt Toulouse pour prendre la direction de l'École française d'ingénieurs de Beyrouth (rattachée à l'université de Lyon). Baubiach soutient sa thèse d'ingénieur-docteur le mois suivant³¹. Son contrat de collaborateur scientifique est alors renouvelé pour une étude « de dispositifs dynamométriques à lampes triodes pour la mesure des résistances hydrodynamiques »³². Luis Castagnetto, ingénieur IET, engage des recherches sur les tourbillons de sillage et soutient une thèse d'ingénieur-docteur en 1939³³.

²⁸ C. Camichel, *Rapp. UT 1933-1934* ; Arrêté minist. du 23 févr. 1934. Le contrat de Sabathé est renouvelé jusqu'en déc. 1937.

²⁹ Sabathé (1936).

³⁰ J. Nougare, *Les principaux événements qui jalonnent l'histoire d'un laboratoire d'hydraulique et de mécanique des fluides*. Arch. IMFT (non daté).

³¹ Cf. Annexe A pour la liste des thèses.

³² C. Camichel, *Rapp. UT 1936-1937* ; Arrêté minist. du 12 déc. 1936.

³³ Cf. Annexe A ; C. Camichel, *Rapp. UT 1938-1939*, p. 98.



Figure 6.2 Maquette d'une coque d'hydravion (Laté 631) dans le canal droit. Arch. IMFT.

L'institut de mécanique des fluides, bien que formellement indépendant de l'institut électrotechnique et de rang égal, fonctionnera en réalité comme un laboratoire de ce dernier. Ainsi en novembre 1936, dans un rapport pour le ministre de la Défense nationale en vue de la mobilisation des laboratoires en temps de guerre, Camichel présente l'organisation de l'IET comme suit, sans mention explicite de l'institut de mécanique des fluides³⁴ :

1. Laboratoires d'hydraulique, bassin d'essais des coques d'hydravions :
 - Léopold Escande, ingénieur principal, sous-directeur de l'IET,
 - Jean Baubiac, ingénieur IET et ESE, collaborateur scientifique de l'Air,
 - M. Borel, ingénieur IET,
 - M. Descomps, mécanicien ;
2. Service des essais en soufflerie (en projet) :
 - Georges Sabathé, ingénieur IET, collaborateur scientifique de l'Air,

³⁴ Arch. nat. 19800284 14.

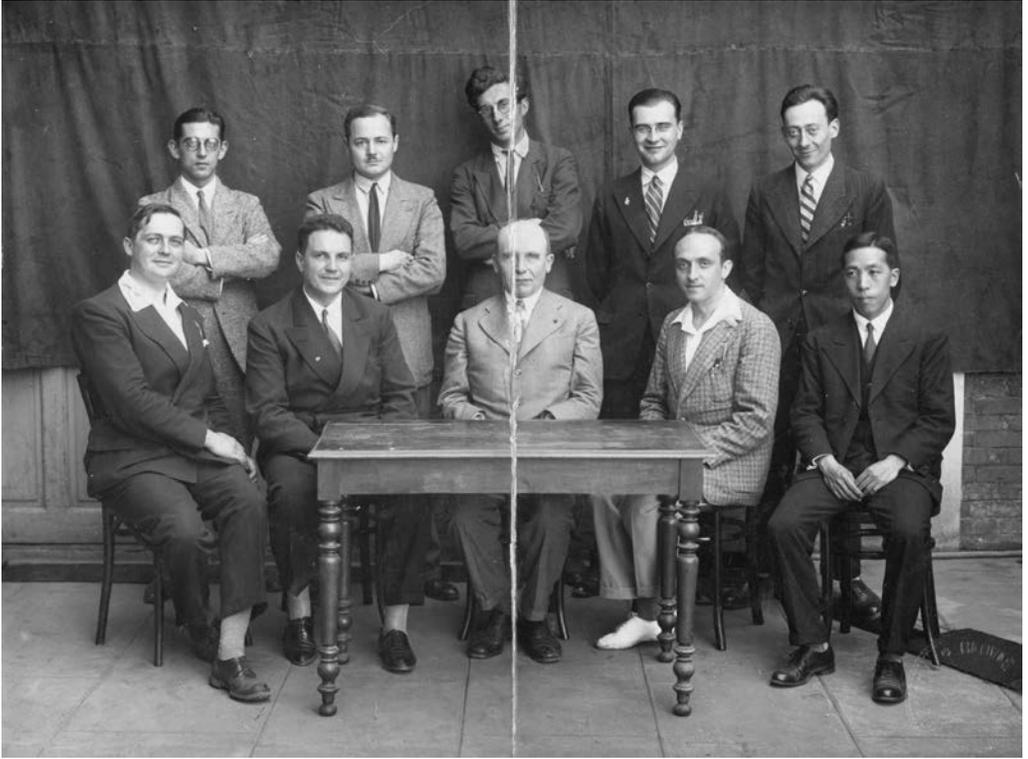


Figure 6.3 Photo de famille, vers 1935. Assis de g. à dr. : M. Teissié-Solier, L. Escande, Ch. Camichel, P. Dupin, K. Otsubo ? ; debout : G. Sabathé ?, É. Crausse, R. Favre-Artigues, J. Baubiac, J. Lhomme. Arch. IMFT, fonds Crausse.

- Marcel Sabathé, ingénieur IET,
- M. Salva, conducteur IET, mécanicien,
- Raymond Rieu, conducteur IET, mécanicien ;
- 3. Service de sans-fil (émission, réception, transmission) :
 - Pierre Dupin, ingénieur IET, docteur ès sciences,
 - Roger Favre-Artigues, ingénieur IET et ÉSE,
 - Edmond Perriard, mécanicien-électricien ;
- 4. Bureau de contrôle, laboratoire d'essais :
 - Max Teissié-Solier, ingénieur IET, docteur ès sciences, chef des travaux à la faculté des sciences,
 - Jean Lhomme, ingénieur IET, directeur des ateliers,
 - Edmond Perriard, mécanicien-électricien.

L'IET compte également un secrétaire, Georges Bouteille. La Figure 6.3 montre une « photo de famille » du personnel enseignant vers 1935.

La maîtrise de conférences d'Escande est transformée en chaire d'université en 1937. Une convention en bonne et due forme entre l'université et le ministère de l'Air est signée l'année suivante³⁵. Cette convention supprime notamment le poste d'assistant occupé par Sabathé, qui semble alors quitter l'institut. L'année suivante, deux nouvelles études sont commanditées par le ministère de l'Air, l'une sur les ondes radio-électriques décimétriques, l'autre sur la mise au point d'une balance hydrodynamique pour le chariot auto-tracté du bassin des carènes.

Un canal pour les maquettes d'hydravions ? En 1939, un projet de très grand canal, pour l'étude des coques d'hydravions, est discuté avec le ministère de l'Air et la Ville. Ce projet remet à l'ordre du jour l'ancien projet de canal pour l'hydraulique fluviale, discuté entre 1924 et 1927 et finalement abandonné (cf. chap. précédent). Deux emplacements sont successivement envisagés sur l'île du Ramier. Contesté par les ingénieurs de la Ville pour son gigantisme et entravé par l'entrée en guerre du pays, ce projet ne sera jamais réalisé³⁶.

6.2.4. La soufflerie aérodynamique

La construction d'une soufflerie aérodynamique, envisagée par Caquot dès sa première lettre au recteur en 1929, est décidée en 1935. En novembre, le maire de Toulouse accorde l'occupation d'une nouvelle parcelle du parc Toulousain, de 1661 mètres carrés, contiguë au canal droit (voir le plan sur la Figure 5.6). Une subvention de 450 000 francs est allouée par le ministère de l'Air, bientôt complétée par une seconde subvention de 75 000 francs³⁷. Les travaux démarrent en août, réalisés par l'entreprise Rouzaud & Fils (440 000 francs). La hauteur de l'installation est de 9 mètres et sa longueur de 27 mètres (Figure 6.4). La veine

³⁵ La convention est signée le 16 août 1938. AD31, 2559 162.

³⁶ Pour les péripéties associées à ce projet, cf. Charru (2021, chap. 8).

³⁷ C. Camichel, *Rapp. UT 1935-1936* ; Le maire de Toulouse à Camichel, 27 nov. 1935, Arch. ENSEEIHT ; Arch. nat. F17 14566, dossier Rouzaud (16 pages) et décision du 18 mars 1936 de versement de la première subvention ; seconde subvention le 30 sept.

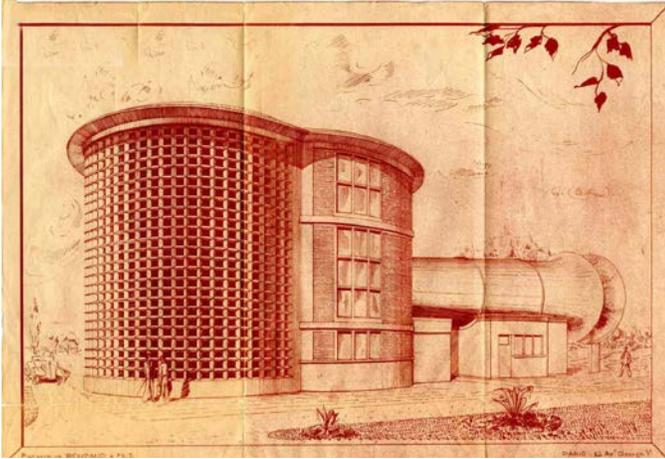


Figure 6.4 Esquisse de la soufflerie ; de gauche à droite : structure en nid d'abeilles de l'entrée d'air, bâtiment contenant la section d'essais, et diffuseur à l'extrémité duquel se trouve le ventilateur. Arch. IMFT.

d'air dans la section d'essais a pour diamètre 2,4 mètres et sa vitesse y atteint 40 mètres par seconde. La balance des forces aérodynamiques sur la maquette est fournie par deux ingénieurs de l'institut aérotechnique de Saint-Cyr, Maurice Denis et Frédéric Gruson (balance « Denis-Gruson », 66 000 francs).

Les essais de réception sont réalisés en septembre 1938. La première étude, conduite au cours de l'été pour le compte des services de l'Aéronautique (SRAé), porte sur un profil d'aile en magnésium (métal très léger alors prisé). Il s'agit de comparer les coefficients de traînée et de portance du profil, pour diverses incidences, avec ceux obtenus dans les principales souffleries françaises, du service des recherches de l'Aéronautique (à Issy-les-Moulineaux et à Chalais-Meudon), du laboratoire Eiffel et de l'institut de Lille. La Figure 6.5 présente le coefficient de portance obtenu, en fonction de l'incidence, et montre un bon accord³⁸. L'activité commerciale quant à elle croît rapidement, notamment pour les constructeurs toulousains Latécoère et la SNCA du Midi (Avions Dewoitine). Les recettes pour l'année 1939 s'élèvent à 182 045 francs, couvrant déjà le tiers du coût de la construction³⁹.

³⁸ Annexe au rapport n° 1 (nov. 1938). AD31, 7003 W1. Les Archives de la Haute-Garonne sont dépositaires de l'ensemble des 1100 rapports d'essais réalisés à la soufflerie de l'IMFT entre 1938 et 1996 (fonds 7003 W).

³⁹ Arch. ENSEEIHT.

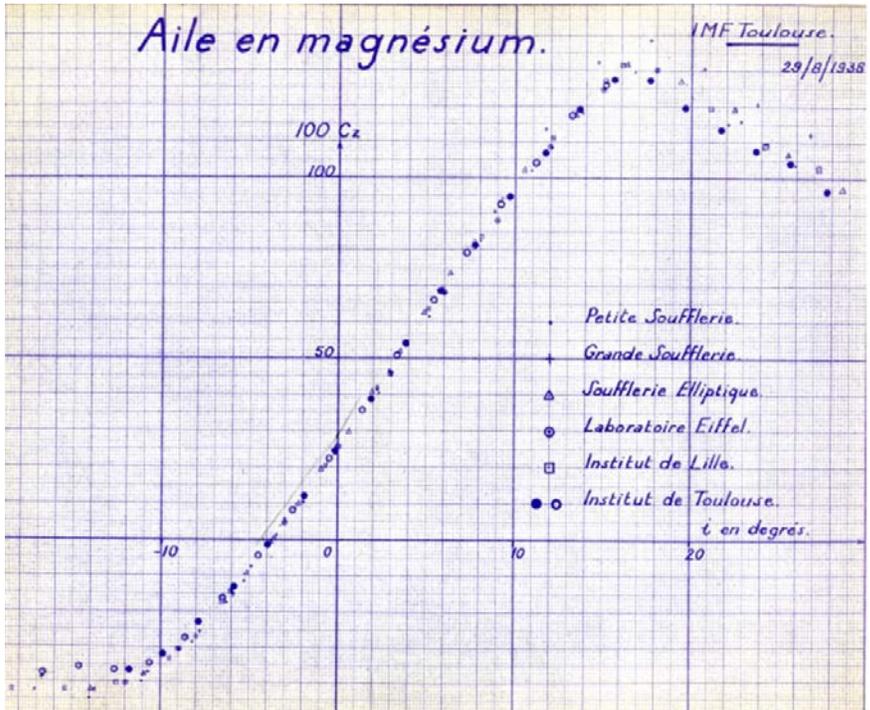


Figure 6.5 Coefficient de portance d'une aile en magnésium en fonction de l'angle d'incidence, mesuré dans les souffleries du SRAé (« petite » et « grande »), de Chalais-Meudon, d'Auteuil (Eiffel), de Lille et de Toulouse ; vitesse de l'air : 30 m/s. AD31, 7003 W1.

6.3. Rayonnement de la mécanique des fluides toulousaine

Les travaux scientifiques réalisés au laboratoire d'hydraulique de l'université de Toulouse (présentés au chapitre suivant) acquièrent dès le début des années 1920 une grande notoriété. Son directeur Camichel, en plus de son activité proprement scientifique, occupe dans l'entre-deux-guerres plusieurs fonctions nationales d'administration de l'enseignement et de la recherche, notamment au sein du Comité consultatif de l'Enseignement supérieur au ministère de l'Instruction publique, au ministère des Travaux publics, et au Conseil supérieur des recherches du ministère de l'Air. Membre de diverses sociétés savantes, il préside en 1930 la section d'hydraulique générale de la Société hydrotechnique de

France (SHF). Au niveau international, Camichel est l'un des deux Français invités pour une conférence générale au deuxième Congrès international de mécanique appliquée (ICAM), à Zurich en 1926. Il est membre de l'Institut de Coïmbra (Portugal, 1925), professeur d'échange à l'université de Bruxelles (1931), et membre d'honneur de l'Association des ingénieurs de l'Université de Liège (1932). Il participe dès 1932 aux travaux de la commission internationale qui donne naissance en 1935 à l'association internationale de recherches hydrauliques (IARH).

Camichel, correspondant de l'Académie des sciences depuis 1922, en est élu membre non résidant en 1936⁴⁰. Comme il l'évoque lors de la cérémonie toulousaine célébrant cette élection, sa conception de la recherche a été profondément marquée par sa formation à l'École normale supérieure :

Une influence dont j'ai toujours ressenti la force, c'est celle de l'École normale, notre chère et grande École, non pas seulement dans son enseignement mais dans les conversations, les conseils et les influences imposantes qui se dégagent d'un tel milieu ; c'est l'enseignement vivant que les machines parlantes pas plus que les livres ne remplaceront jamais.

C'est à l'École normale que j'ai appris la complexité des phénomènes que l'on étudie dans les laboratoires, la difficulté des approximations et, d'une façon générale, la profondeur et la grandeur de la recherche expérimentale, l'enthousiasme pour la recherche désintéressée ; c'est là que j'ai compris la grandeur et la noblesse de la carrière universitaire⁴¹.

⁴⁰ Élu le 17 février 1936 au premier tour de scrutin, avec 39 voix sur 52 suffrages exprimés. Camichel est, pour le xx^e siècle, le troisième professeur de la faculté des sciences de Toulouse élu membre de l'Académie des sciences, après Paul Sabatier, chimiste, et Eugène Cosserat, mathématicien et astronome (décédé en 1931) ; la faculté des lettres compte, pour la même période, deux membres de l'Institut : Félix Dürrbach, archéologue helléniste (décédé en 1931), et Joseph Calmette, historien médiéviste.

⁴¹ Réponse de M. Charles Camichel aux discours en son honneur lors de sa réception à l'Institut, *in* (Association Amicale des Ingénieurs Anciens Élèves de l'IETMA de Toulouse, 1936, p. 46-54). Une cérémonie est également organisée dans son village natal, Montagnac, dont une rue (la rue du temple où officiait son père pasteur protestant) est baptisée à son nom.

Au cours de la même cérémonie, le recteur Gheusi livre quelques traits de sa personnalité :

Je borne là mes constatations sur l'œuvre de Charles Camichel et je voudrais très brièvement [...], je voudrais vous dire comment je vois l'homme : Réfléchi, modeste, réservé ; plus que cela, effacé, ayant horreur du premier plan et de la vedette. Et, derrière cet effacement, qui revêt parfois les manières d'une timidité foncière, un plan très arrêté, suivi avec une obstination silencieuse, patiente et méthodique, comme il arrive chez les hommes qui font leur conviction sur les données de l'expérience, cent fois reprise et contrôlée. Et, aussi [...], notre ami possède un sens averti de l'homme qui en fait un diplomate excellent. [...]

Le directeur Camichel possède tout cela en une complète harmonie et, à côté des manettes qu'il pourra vous montrer dans son établissement électrotechnique, il y a celles que, pour mon compte, je prise plus encore, ce sont les manettes morales à l'aide desquelles il arrive toujours à ses fins et mène à bon port son programme de développement scientifique. Je sais bien qu'il se récuse quand on le félicite et qu'il a pris l'habitude de reporter tous les mérites sur l'équipe de collaborateurs qui l'entourent. [...] Or, les initiés savent à quoi s'en tenir⁴².

6.4. La période de la guerre

En 1938, l'Office national des recherches scientifiques, industrielles et des inventions (ONRSII) est supprimé et remplacé par un Centre national de la recherche scientifique appliquée (CNRSA) dont la direction est confiée au minéralogiste Henri Longchambon. Dans un contexte de fortes tensions avec l'Allemagne, la première mission de Longchambon est d'élaborer un plan de mobilisation scientifique. Ce plan entre en vigueur dès la déclaration

⁴² Allocution de M. le Recteur Gheusi à la cérémonie de remise de l'épée d'académicien, *in* (Association Amicale des Ingénieurs Anciens Élèves de l'IETMA de Toulouse, 1936, p. 17-22).

de guerre en septembre 1939⁴³. Le CNRSA devient le mois suivant la section de recherche appliquée du tout nouveau CNRS⁴⁴.

6.4.1. Toulouse ville de repli

Repli des centres de recherche aéronautique. Conformément au plan de mobilisation, les laboratoires parisiens liés à l'aéronautique se replient à Toulouse où ils rejoignent des services du ministère de l'Air arrivés au printemps⁴⁵. Toulouse devient ainsi pendant la guerre le cœur national des recherches en aérodynamique. Les personnels de l'institut de mécanique de Paris sont accueillis à l'IET, notamment Henri Villat, Jean Villey, Joseph Pères et Adrien Foch, ainsi que les assistants des deux derniers et le mathématicien Émile Picard ; certains y sont logés avec leur famille⁴⁶. L'armistice signé, ces universitaires rentrent à Paris à la fin de l'année 1940 – et trouvent leurs laboratoires occupés par l'armée allemande. L'institut de mécanique des fluides de Lille (IMFL), également replié à Toulouse et installé dans une chapelle désaffectée mitoyenne de l'IET, reste à Toulouse pour poursuivre des études pour le GRA.

Les services techniques du ministère de l'Air, initialement installés à l'IET, déménagent en décembre 1940 dans les locaux de la caserne Pérignon où ils rejoignent les services de l'École nationale supérieure de l'Aéronautique (Sup'Aéro). Le service des recherches de l'Aéronautique, l'Établissement d'expériences techniques d'Issy-les-Moulineaux (EETIM) et l'institut aérotechnique de Saint-Cyr se retrouvent, quant à eux, dans des bâtiments nouvellement construits à l'est de la ville – bâtiments initialement destinés à l'École vétérinaire. Autour de ces structures se

⁴³ Instruction générale n° 1 aux directeurs de groupes du Centre national de la recherche scientifique appliquée (copie non datée, approx. été 1939). Arch. nat. AJ16 5822.

⁴⁴ Guthleben (2013, p. 16-17, 30, 34-38).

⁴⁵ M. Andant, M. Labussière et M. Dalmont, Compte rendu de mission dans les établissements scientifiques de l'enseignement supérieure de Toulouse, du 18 au 22 avril 1939. Arch. nat. 19800284/13-14.

⁴⁶ C. Camichel, *Rapp. UT 1939-1940* et *Rapp. UT 1940-1941* ; Barrera (2020d, p. 574).

constitue, fin 1941, un Établissement de recherches aéronautiques de Toulouse (ERAT)⁴⁷.

Enseignements et recherches. Les enseignements à l'institut électrotechnique, interrompus pendant l'année scolaire 1939-1940, reprennent dès l'année suivante. Les étudiants sont alors nombreux, l'arrivée de repliés des universités de la zone occupée compensant largement le départ des étrangers. En plus des cours réguliers, quatorze conférences sont données à l'IET dont deux par Joseph Kampé de Fériet, directeur de l'institut de Lille. Ces dernières portent sur la turbulence avec pour titres :

- La turbulence en soufflerie et son influence sur les mesures aérodynamiques ;
- La turbulence atmosphérique et quelques-unes de ses conséquences pour la météorologie et pour l'avion.

Georges Dubois, ingénieur-docteur de l'université de Caen, donne une conférence sur l'étude en soufflerie de la chute en vrille des avions⁴⁸. Pierre de Valroger, ingénieur en chef de l'Aéronautique, discute « La propulsion par réaction et ses applications prochaines à l'aviation stratosphérique à grande vitesse ». L'année suivante, le nombre de conférences se réduit à deux seulement, données par Esteve Terradas, inspecteur général du ministère de l'Air espagnol, sur les thèmes suivants :

- L'influence du vent sur la hauteur de la mer à la côte et dans les estuaires ;
- Problème d'ordre technique dans le projet des aérodromes à grand trafic.

Les conférences invitées s'interrompent ensuite. En 1943, Esteve Terradas est distingué *Docteur honoris causa* de l'université de Toulouse.

⁴⁷ Après la guerre, les bâtiments libérés accueilleront l'École nationale supérieure d'ingénieurs des constructions aéronautiques (ENSICA), tandis que l'ERAT se restructurera en 1949, sur des terrains voisins, en Centre d'études aéronautiques de Toulouse (CEAT) pour des essais de structures et d'équipements (Weber, 2003, p. 180, 225).

⁴⁸ C. Camichel, *Rapp. UT 1940-1941*. G. Dubois est l'auteur de deux mémoires des *Publications scientifiques et techniques du ministère de l'Air*, en 1938 et 1946. Ses travaux sont résumés par Lapresle (1949, p. 152-162).

En ce qui concerne la recherche proprement dite, la brillante période de l'entre-deux-guerres se clôt, tant du fait des circonstances que de la dispersion de l'équipe rassemblée par Camichel. Crausse a quitté l'institut en 1936, après la soutenance de sa thèse, pour prendre la direction de l'École française d'ingénieurs de Beyrouth. Baubiac quitte à son tour l'institut en janvier 1941 pour prendre la direction du service électrique de la Ville de Toulouse. Dupin et Teissié-Solier réorientent leurs recherches vers l'électrotechnique et la radio-électricité. Les expériences sur les ondes ultra-courtes réalisées entre l'IET et le pic du Midi s'interrompent cependant après l'Armistice du fait de la suppression des autorisations d'émettre⁴⁹.

Camichel, membre d'un « comité de propagande régionaliste », organise en mai 1941, à la demande du préfet, trois « Journées de l'Électricité » qui remportent « un important succès ». Il prend sa retraite au d'août suivant, à l'âge de 70 ans, conserve encore quelques mois les directions de l'IET et de l'IMFT, puis les cède à Escande en mars 1942. Dupin devient directeur-adjoint de l'IET. Escande, scientifiquement isolé, poursuit ses études pour l'industrie hydroélectrique. Il délègue la responsabilité des essais en soufflerie à Georges Sabathé, collaborateur scientifique du ministère de l'Air, et à Louis Castex, ingénieur contractuel.

6.4.2. Activité de la soufflerie

La soufflerie de l'IMFT connaît au début de la guerre une forte croissance de son activité. Dès l'automne 1939, dans le contexte de la mobilisation générale, Albert Caquot presse Camichel :

La Société nationale de constructions aéronautiques du Midi [avions Dewoitine] me communique le programme des essais à effectuer par la soufflerie de Toulouse. Je vous demande de bien vouloir prendre les mesures nécessaires pour que ce programme puisse être exécuté sans retard, au besoin en faisant travailler à deux et même à trois équipes s'il est indispensable. J'attache en effet la plus grande importance à ce que toutes les usines de la Région s'adressent à vous pour satisfaire aux essais qui peuvent leur être nécessaires.

⁴⁹ C. Camichel, *Rapp. UT 1939-1940* et *Rapp. UT 1940-1941* ; sur la carrière ultérieure de É. Crausse, cf. Hager (2009, p. 932).

Je vous serais reconnaissant de bien vouloir me tenir au courant de ce que vous aurez pu faire, en ce sens⁵⁰.

Quelques jours plus tard, Antonin Lapresle, directeur du service des recherches de l'Aéronautique en cours de repliement sur Toulouse, sollicite à son tour Camichel. Celui-ci lui fait alors état de la forte charge de la soufflerie :

En ce qui concerne l'utilisation de notre soufflerie actuelle pour vos services de recherches, cette utilisation est possible, mais il faut toutefois remarquer que tous les prototypes de la Société Nationale des Constructions Aéronautiques du Midi (Avions Dewoitine) sont étudiés chez nous depuis plus d'un an et absorbent intégralement l'activité de notre soufflerie, à raison d'une moyenne de 55 heures par semaine environ, avec des pointes plus intenses. Une lettre récente de M. Caquot, dont nous joignons copie ci-inclus, nous fait prévoir un programme notablement plus important. Dans ces conditions, nous pensons qu'il sera indispensable de prévoir la marche à deux et peut-être trois équipes si vous utilisez cette soufflerie.

Parmi les utilisateurs, figure l'industriel et scientifique Georges Darrieus, proche de Camichel, qui a replié son entreprise à Toulouse. Il y expérimente, avec son associé G. Lacroix, un nouveau type d'éolienne à axe vertical qu'il a breveté⁵¹.

Édifiée en plein air, la soufflerie est soumise aux aléas météorologiques, notamment au vent auquel les mesures s'avèrent sensibles. Camichel, soutenu par Société méridionale aéronautique (fondée par Breguet et Latécoère), obtient donc du ministère de l'Air, au début de l'année 1940, des crédits pour la construction d'un bâtiment de couverture. Les travaux sont engagés en avril 1941 et achevés en 1942⁵². Le bâtiment comprend, outre la soufflerie

⁵⁰ A. Caquot à C. Camichel, 14 nov. 1939. Arch. ENSEEIHT.

⁵¹ Georges Darrieus (1888-1979), ingénieur de l'École centrale de Paris, président de la Société française des électriciens puis de la Société des ingénieurs civils de France. Il est élu à l'Académie des sciences en 1946, dans la section des applications de la science à l'industrie, puis en 1976 dans la section des sciences mécaniques.

⁵² C. Camichel, *Rapp. UT 1941-1942*. En 1998, la soufflerie et son bâtiment seront inscrits à l'inventaire des Monuments historiques.

proprement dite, des bureaux pour la préparation et le dépouillement des essais. Plus de 60 personnes y travaillent à raison de 60 à 70 heures par semaine⁵³ – la soufflerie de Barlève est alors l'unique soufflerie en service dans la zone libre. Près de 150 rapports sont produits en 1942 et autant l'année suivante, pour les sociétés aéronautiques, pour les services de l'Aéronautique, et dans une moindre mesure pour le GRA (Figure 6.6). L'occupation de Toulouse par l'armée allemande, à partir de novembre 1942, ne ralentit pas le rythme de l'activité.

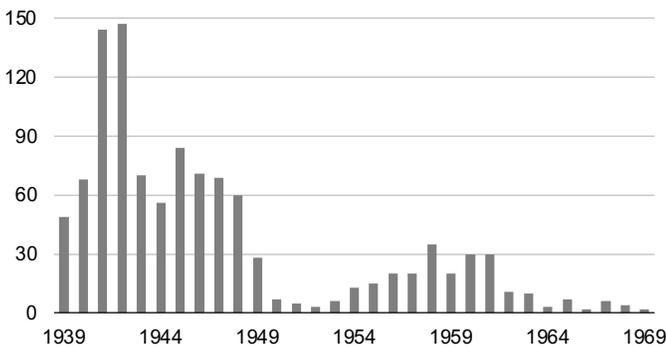


Figure 6.6 Nombre d'essais réalisés à la soufflerie de l'IMFT entre 1939 et 1969, pour les services de l'Aéronautique et les constructeurs. Source : AD31, 7003 W.

Les essais sont brutalement interrompus en juillet 1943 par une explosion qui détruit le ventilateur, pièce imposante de 4,3 mètres de diamètre (Figure 6.7). Dans son rapport au conseil de l'université, Escande se veut rassurant :

La soufflerie a subi en juillet un incident mécanique qui a provoqué la rupture de plusieurs pales de la turbine à air. Les travaux de réparation, engagés sans retard, seront relativement longs en raison des difficultés de toutes sortes qui découlent de la situation exceptionnelle dans laquelle nous nous trouvons. Cette interruption de plusieurs mois de notre soufflerie aérodynamique n'affectera nullement la situation financière de l'institut de mécanique des fluides, les recettes de cette soufflerie pendant le premier semestre

⁵³ J. Nougaro, *Les principaux événements qui jalonnent l'histoire d'un laboratoire d'hydraulique et de mécanique des fluides*. Arch. IMFT (non daté).

Figure 6.7 Maquette dans la veine d'essais de la soufflerie de Toulouse (diamètre 2,4 mètres), dans les années 1950, et au fond ventilateur d'aspiration de l'air (diamètre 4,6 mètres). Le ventilateur détruit en 1943 comportait trois pales en bois. Arch. IMFT.



ayant atteint nos prévisions budgétaires pour l'année entière qui semblaient pourtant optimistes. [...] C'est ainsi que la soufflerie aérodynamique apporte depuis sa création, en 1939, son concours le plus complet aux entreprises régionales ; SNCASE à Toulouse, société des Ateliers d'aviation Louis Breguet, Société industrielle d'aviation Latécoère, etc.⁵⁴.

L'« incident mécanique » pourrait correspondre, dans le contexte des nombreux sabotages qui affectent la région toulousaine durant l'année 1943, à une attaque de la Résistance⁵⁵. Les essais ne reprennent qu'en mai 1944 après dix mois d'interruption. Cette période troublée voit Sabathé, responsable technique des essais, exclu de la soufflerie (avant l'incident) pour une faute dont le motif n'a pas été conservé dans les archives. Un autre collaborateur scientifique, Charles Bory, est recruté en

⁵⁴ L. Escande, *Rapp. UT 1942-1943*. La SNCA du Midi a été absorbée par la SNCA du Sud-Est en 1941 (Chadeau 1987, p. 247, 363). Cette société s'intégrera à Sud-Aviation en 1957, puis à la SNIAS en 1970 et enfin à l'Aérospatiale, qui deviendra EADS.

⁵⁵ Entretien de l'auteur avec Clair Juilliet, déc. 2016. La presse locale consultée (*La Dépêche*, *Le Midi socialiste*) ne dit mot de l'événement.

octobre 1942 pour une étude sur « la convection naturelle par les fils et les cylindres ». Il soutient une thèse de doctorat ès sciences en 1943 puis publie trois notes aux *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, en collaboration avec Camichel, sur l'orientation des veines liquides⁵⁶.

Les études en soufflerie réalisées pendant la guerre sont purement techniques, sans enjeu scientifique. Une exception est celle d'Alexandre Favre, maître de conférences à l'institut de Marseille, relative à un dispositif de prévention du décollement de l'écoulement sur l'extrados des ailes, dispositif « hypersustentateur à paroi d'extrados mobile »⁵⁷. Une autre exception est l'étude sur la diffusion turbulente réalisée par un étudiant de l'institut de Lille, François Naftali Frenkiel, dans le cadre de sa thèse de doctorat (voir plus loin).

La soufflerie toulousaine, fruit d'un investissement financier considérable répondant à des considérations stratégiques nationales – disposer d'une grande soufflerie dans le sud de la France –, n'a pas donc pas suscité chez les Toulousains d'intérêt scientifique pour l'aérodynamique ni pour la turbulence. L'absence de compétences dans ces domaines et le tropisme toulousain pour l'hydraulique, renforcé par Escande après le départ à la retraite de Camichel, n'ont pas permis cette ouverture⁵⁸.

⁵⁶ C. R. **218**, 816 (1944) ; C. R. **220**, 418 (1945) ; C. R. **222**, 348 (1946). Charles Bory, professeur au lycée de Toulouse, est collaborateur scientifique d'octobre 1942 à septembre 1943. Sa thèse de doctorat ès sciences, que nous n'avons pu retrouver, aurait été soutenue en 1943 (elle est mentionnée par le doyen de la faculté dans son rapport pour l'année 1942-1943 (p. 83), mais Escande dans son propre rapport ne la mentionne pas). Une demande de création d'un poste d'assistant, en octobre 1943, semble n'avoir pas abouti (Escande au recteur, lettres du 13 oct. et du 17 déc. 1943 ; conseil de la faculté du 5 janv. 1944. Arch. ENSEEIHT ; AD31, 2559 162).

⁵⁷ Rapports n° 449 (9 avr. 1943) et n° 489 (27 juin 1944) pour le GRA (AD31, 7003 W) ; A. Favre, Aile d'avion munie d'un volet hypersustentateur à paroi mobile. C. R. Acad. Sc. **220**, 386 et 434 (1945).

⁵⁸ La soufflerie de l'institut de Marseille, dont la construction a démarré en 1938, n'entrera en service qu'en 1948.

6.4.3. L'aéronautique nationale sous le gouvernement de Vichy

L'armistice du 22 juin 1940, consécutif à l'offensive allemande foudroyante du mois précédent, stipule que l'administration française et les usines situées en zone occupée seront désormais sous contrôle allemand. Le maintien d'une activité de construction aéronautique française est autorisé, mais dans le cadre d'une politique de collaboration impliquant la mise à disposition de l'occupant des appareils construits ainsi que la maintenance et la réparation de ses matériels.

Le gouvernement de Vichy demande ainsi à Caquot, au mois d'août, que soient livrés à l'Allemagne vingt-quatre avions Bloch français en cours de fabrication. Mais Caquot refuse et, après une entrevue avec Pierre Laval, bras droit de Pétain, il démissionne de toutes ses fonctions aéronautiques⁵⁹. La collaboration, associée à une « épuration » des sociétés nationales par Vichy, est formalisée en juillet 1941 par la signature d'un accord relatif à un programme aéronautique « commun » franco-allemand, négocié par le secrétaire d'État à l'Aviation, le général Jean Bergeret⁶⁰. Ce programme deviendra à partir de novembre 1942 un programme purement allemand. Certains constructeurs refusent cependant de collaborer, notamment Marcel Bloch (alias Marcel Dassault), qui sera interné puis déporté à Buchenwald.

Le GRA, replié à Orléans puis à Clermont-Ferrand, demeure le lien entre l'aéronautique nationale et les instituts de mécanique des fluides. Très lié au secrétariat d'État à l'Aviation (qui s'est substitué au ministère de l'Air), il ordonne des études techniques et finance, notamment, la réinstallation de l'institut de Lille à Toulouse et la poursuite de la construction de la soufflerie de l'institut de Marseille.

⁵⁹ Kerisel (2001, p. 109) ; A. Caquot, *Notices sur les travaux scientifiques (1930, 1934)*, Arch. Acad. Sc.

⁶⁰ Chadeau (1987, p. 351-363) ; d'Abzac-Epezy (2016).

6.4.4. L'institut de mécanique des fluides de Lille

L'institut de mécanique des fluides de Lille, replié à Toulouse en juin 1940, a cohabité avec l'institut de Toulouse pendant cinq années. Cette section examine les relations que les deux instituts ont alors pu entretenir.

L'institut de Lille. Créé en 1930, l'institut de Lille a connu un développement rapide sous la direction de Joseph Kampé de Fériet, mathématicien, assisté par André Martinot-Lagarde, physicien⁶¹. Installé en 1934 dans de vastes bâtiments neufs, l'institut possède notamment une grande soufflerie, complétée en 1938 par une soufflerie verticale pour l'étude des vrilles d'avions. Il entretient des liens forts avec l'industrie régionale, en particulier avec le constructeur aéronautique Henri Potez. Il héberge un service national de météorologie, opéré par du personnel militaire, qui échange ses relevés de mesures (température, pression, vitesse du vent, etc.) avec d'autres centres en France et à l'étranger, pour l'établissement de cartes de prévisions essentielles à la navigation aérienne. Ce lien avec la météorologie infléchit les recherches de l'institut, ainsi que ses actions de formation, vers la dynamique de l'atmosphère et vers un aspect essentiel de cette dynamique : la turbulence. Cette inflexion se renforce à partir de 1935 où l'IMFL s'associe aux travaux d'une Commission de la turbulence atmosphérique, créée par le ministère de l'Air pour rapprocher météorologistes et universitaires. Cette commission est présidée par le directeur de l'Office national météorologique (ONM), Philippe Wehrlé.

Kampé de Fériet est l'un des premiers, en France, à s'intéresser à la turbulence. Mathématicien porté vers l'aspect théorique des problèmes, son ouverture d'esprit l'engage à s'intéresser de près aux expérimentations, tant en soufflerie que dans l'atmosphère – sensibilité acquise pendant la guerre à la Commission d'artillerie de Gâvre (Morbihan)⁶². En collaboration avec l'ONM, il organise des campagnes de mesure du vent au voisinage du sol à l'aide de fusées traçantes, de cerfs-volants et de ballons.

⁶¹ Demuro (2017, 2018) ; Charru (2021, chap. 6).

⁶² Demuro (2018).

Figure 6.8
L'anémoclinomètre (sphère percée de trous) monté à l'avant du fuselage de l'avion-laboratoire Potez de la Commission de la turbulence atmosphérique.



Il met au point, avec Martinot-Lagarde et un ingénieur de l'institut, un nouvel anémomètre capable de mesurer et d'enregistrer les fluctuations du vent dans les trois directions, « l'anémoclinomètre ». L'appareil, breveté et exporté à l'étranger, est embarqué dans un avion-laboratoire afin d'étudier la turbulence au voisinage des nuages (Figure 6.8). Sur le plan théorique, Kampé de Fériet s'attache à préciser mathématiquement les concepts introduits pour l'étude de la turbulence, tel que celui de « grandeur moyenne ». Il s'intéresse également aux propriétés de mélange et de diffusion des mouvements turbulents, et contribue à leur théorie en cours de développement autour de Geoffrey I. Taylor à Cambridge (Angleterre).

Kampé de Fériet mène ses recherches en relation étroite avec le milieu international. Il entretient une correspondance nourrie avec ses collègues étrangers, notamment avec Theodore von Kármán aux États-Unis, et il est membre étranger de la société aéronautique allemande *Lilienthal*. Il participe assidûment aux congrès internationaux de mécanique appliquée (ICAM), congrès quadriennaux inaugurés en 1922 par Kármán⁶³.

⁶³ Charru (2021, chap. 3).

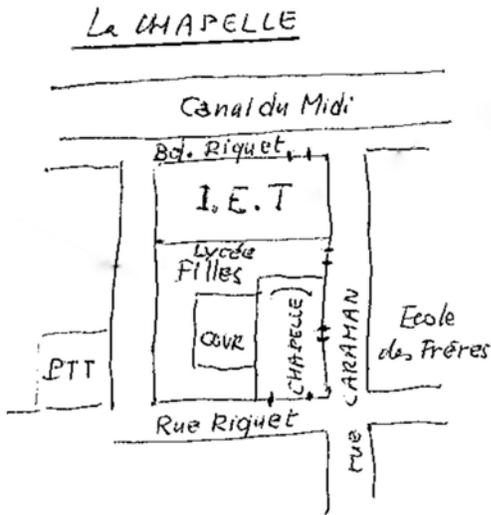


Figure 6.9 Croquis localisant l'IET et la chapelle où l'institut de mécanique des fluides de Lille installe son laboratoire pendant la guerre. M. Dubois, Arch. IMFL, ONERA Lille.

L'institut de Lille à Toulouse. Le 16 mai, l'institut de Lille est enjoint par le GRA, sa tutelle depuis 1938, de quitter Lille dès le lendemain et de rejoindre Orléans⁶⁴. Ses personnels et leurs familles s'y arrêtent pendant trois semaines puis migrent à Toulouse où ils resteront jusqu'à la Libération. Ils s'installent à leur arrivée dans le château de Péchestier, à l'est de la ville, où s'organise la vie commune et où reprennent tant bien que mal quelques activités scientifiques. À l'automne, une chapelle désaffectée mitoyenne de l'institut électrotechnique est mise à disposition par la Ville, par l'entremise de Charles Camichel, et aménagée en laboratoire avec des financements du GRA (Figure 6.9).

La construction de souffleries est engagée dans la chapelle. En dépit des difficultés d'approvisionnement, une première petite soufflerie est mise en service en avril 1941 et une seconde – occupant la majeure partie de la chapelle – en janvier 1942 (Figure 6.10). Les recherches sont cependant entravées par le décès, fin 1942, de Pierre Dupuis, l'ingénieur spécialiste de l'anémométrie par fil

⁶⁴ M. Dubois (dessinateur à l'IMFL), Notes sur les activités de l'IMFL de mai 1940 à début 1945, Arch. IMFL, ONERA Lille ; M. Dubois, Genèse et construction en 1940-1941 de la grande soufflerie à retour de l'IMFL à Toulouse, Arch. institut PPRIME, Poitiers.

Figure 6.10 Chapelle désaffectée où l'institut de mécanique des fluides de Lille se réinstalle pendant la guerre ; à droite, soufflerie de section octogonale en cours de construction.



chaud – technique de mesure des écoulements turbulents. Cette technique est connue de l'institut de Toulouse, où elle est utilisée depuis quelques années, mais il ne semble pas y avoir eu d'échanges à ce sujet. Une autre difficulté rencontrée par les Lillois est que des clichés photographiques ramenés de Lille (des enregistrements optiques de vitesses turbulentes) ne peuvent pas être dépouillés car le microphotomètre nécessaire à ce dépouillement est resté à Lille. Le problème sera résolu, au début de l'année 1943, par le prêt d'un instrument analogue par le directeur de l'observatoire de Toulouse, Émile Paloque.

Afin de relancer les études en relation avec l'atmosphère, Kampé de Fériet prend contact avec l'association de vol à voile de la Montagne Noire – dont il devient vice-président – et avec les ateliers aéronautiques Fouga à Aire-sur-Adour⁶⁵. Un avion Caudron-Goëland est mis à disposition par la compagnie Air France, pour des expériences menées sur les trajets de l'aérodrome de Toulouse-Francazal à Aire-sur-Adour. L'étude d'un planeur-laboratoire est engagée début 1942. Le planeur livré ne donnant pas satisfaction, un deuxième est mis en chantier, mais l'invasion de la zone libre, en novembre, compromet sa réalisation et met fin à tous les essais en vol.

⁶⁵ Le Centre national d'aviation légère et sportive de la Montagne Noire, créé en 1931, devient rapidement une école de vol à voile de renommée nationale, formant l'élite des vélivoles français (Gaste, 2016, § 21).

François N. Frenkiel. Parmi les personnels lillois repliés, figure François Naftali Frenkiel, étudiant polonais. Après des études d'ingénieur en Pologne et en Belgique, Frenkiel a entrepris en 1938 une thèse, sous la direction de Kampé de Fériet, sur l'analyse statistique de la turbulence. Cette thèse est achevée à Toulouse et complétée par des mesures, à la soufflerie de Banlève, de diffusion de panaches turbulents de gaz ammoniac – par impression sur des tissages de fils imprégnés de substances réactives⁶⁶.

Frenkiel, de confession juive, est congédié par le GRA, son employeur, en décembre 1940⁶⁷. Il poursuit cependant ses recherches en tant que contractuel, soutenu par Kampé de Fériet, tout en cherchant à émigrer vers les États-Unis avec une recommandation de Kármán et une promesse d'emploi à l'université du Michigan. En dépit d'interventions de Kampé de Fériet, de Martinot-Lagarde et du doyen de la faculté des sciences Paul Dop, les complications sans fin opposées par l'administration française empêchent son départ. En avril 1942, le couple Frenkiel est assigné à résidence au camp d'Aulus dans les Pyrénées. Il en est libéré quelques semaines plus tard mais survient en avril 1943 la menace d'une nouvelle arrestation. Le couple décide alors de fuir vers l'Italie. Arrivé à la frontière, il est intercepté par les autorités italiennes et assigné à résidence à Barcelonnette⁶⁸. En septembre, les Italiens se retirent des Alpes-Maritimes, laissant la place aux Allemands. Naftali et Malka, qui n'ont pu fuir avec l'armée italienne, sont arrêtés par les SS et envoyés au camp de Drancy d'où ils sont déportés le 7 décembre vers Auschwitz. Malka, enceinte, y meurt. Naftali est transféré au camp de Buchenwald.

⁶⁶ M. Dubois, Notes sur les activités de l'IMFL de mai 1940 à début 1945 ; lettre de A. Martinot-Lagarde à Georges Mignonac, prof. de chimie à la faculté des sciences de Toulouse, du 16 oct. 40, le remerciant pour l'accueil de Frenkiel dans son laboratoire pour la préparation des réactifs chimiques. Arch. IMFL, ONERA Lille.

⁶⁷ Demuro (2018, p. 282-284) ; Charru (2021, p. 222-223).

⁶⁸ J. Ribot-Sarfati, *Camps d'internement et déportations des juifs dans les Basses-Alpes, de la guerre aux occupations italienne et allemande (1939-1944)*. <https://books.openedition.org/pup/6877>. La note 96 mentionne le couple Frenkiel.

Libéré du camp de Buchenwald par l'armée américaine en avril 1945, après dix-neuf mois de captivité, malade du typhus, Frenkiel reste hospitalisé pendant un an dans un hôpital parisien. Rétabli, il soutient sa thèse le 3 juillet 1946 à Lille – une thèse d'université et non une thèse d'État car il n'a pas le diplôme de licence requis ni l'équivalence que l'administration semble lui avoir refusé. Il émigre peu après aux États-Unis où il deviendra une haute figure de la mécanique des fluides⁶⁹. Il fondera notamment, en 1958, une revue majeure du domaine, *The Physics of Fluids*, qu'il dirigera jusqu'à sa retraite en 1981. La société américaine de physique honore sa mémoire en décernant tous les ans un prix à son nom, le *François Frenkiel Award for Fluid Mechanics*.

Les travaux de Frenkiel, et notamment ses expériences à la soufflerie de Banlève, sont connus par ses publications de l'après-guerre dans les *Comptes rendus de l'Académie des sciences* et par un rapport pour le GRA en 1948 – rapport qui correspond à sa thèse et sera traduit par le Comité national américain pour l'aéronautique (NACA)⁷⁰. Ces publications ne donnent cependant pas d'information sur les conditions matérielles des expériences, ni sur les personnes qu'il a pu fréquenter. Les archives toulousaines (IMFT et université de Toulouse) n'ont conservé aucune trace de son passage.

Relations de l'IMFL avec le GRA. En plus des difficultés liées à la guerre, l'IMFL souffre de relations tendues avec sa tutelle le GRA. L'activité de l'institut est en effet entièrement dédiée aux études techniques que lui ordonne ce dernier, et soumise à une gestion très bureaucratique. Réduit à un rôle d'agent subalterne et sans liberté pour ses recherches personnelles, Kampé de Fériet adresse au directeur du GRA Léon Poincaré, le 5 novembre 1942, une lettre dénonçant le fonctionnement qui lui est imposé, « en contradiction avec [ses] convictions les plus profondes » ; cette lettre se conclut par une demande de rupture de la convention liant l'IMFL (institut de l'université

⁶⁹ Emrich *et al.* (1987).

⁷⁰ F. N. Frenkiel, C. R. *Acad. Sc.* **222**, 367, 473, 585, 1331, 1474 (1946) ; NACA techn. memo. n° 1436 (1958).

de Lille) au GRA⁷¹. La convention n'est pas rompue (les circonstances de la guerre s'y prêtent mal) mais Kampé de Fériet se met en retrait de sa direction – ce sera désormais le secrétaire général de l'institut, Henri Guillemet, qui signera les rapports d'activité. En liaison avec ses recherches sur la turbulence atmosphérique, Kampé de Fériet parvient à effectuer quelques missions à la station aérologique du Mont Lachat en Haute-Savoie⁷². Il envisage de quitter Toulouse, comme on l'apprend au détour d'une lettre adressée en novembre 1944 par le directeur du GRA au personnel de l'IMFL :

À deux reprises au moins Monsieur Kampé de Fériet a pensé quitter Toulouse, une première fois pour gagner l'Afrique du Nord, une seconde fois pour gagner l'Amérique du Sud afin de ne pas risquer d'avoir à travailler un jour pour les Allemands. C'est la Direction du G.R.A. qui l'a dissuadé de mettre ses projets à exécution⁷³.

Kampé de Fériet attendra la Libération pour démissionner de sa direction, et quitter l'IMFL. Martinot-Lagarde (1903-1986) prend alors sa suite, seul universitaire (maître

⁷¹ Kampé de Fériet au directeur du GRA, 5 nov. 1942. Arch. IMFL, ONERA Lille.

⁷² L'institut de Lille et le Club alpin français (CAF) avaient organisé en juillet 1939 un camp d'aérologie alpine, en liaison également avec un club de vol à voile (A. Descamps, *Ciel et Terre*, vol. 56, p. 174-177). Ce camp était installé au col de Vosa, sur la ligne de chemin de fer à crémaillère du Mont-Blanc, à proximité d'un Centre d'essais en altitude de moteurs d'avions créé en 1937 par la Société nationale de construction de moteurs (SNCM). Ce centre, où l'ONM possédait une station d'observation, a ensuite été géré par le GRA. En 1942-1943, le physicien Edmond Brun, du laboratoire du CNRS de Meudon-Bellevue, a mené dans la soufflerie de ce centre des campagnes d'essais sur le givrage (Guthleben, 2013, p. 75) ; L. Malavard, Notice nécrologique sur Edmond A. Brun, *C. R.* **290** 153–159 (1980).

⁷³ Lettre de Léon Poincaré, directeur du GRA, au personnel de l'IMFL, 9 nov. 1944. Arch. IMFL, ONERA Lille. L'objet principal de cette lettre est de sermonner les personnels de l'IMFL au sujet de la constitution d'un Comité de libération, susceptible, estime peut-être Poincaré, de mettre le GRA en mauvaise posture vis-à-vis d'accusations de collaboration. La sincérité des lignes citées ci-dessus est donc douteuse.

de conférences sans thèse) d'un institut où dominent ingénieurs et techniciens contractuels.

Des opportunités de collaboration manquées ? Les directeurs des instituts de mécanique des fluides de Lille et de Toulouse, Kampé de Fériet et Camichel, se connaissent bien. Ils se sont notamment rencontrés au premier congrès national de mécanique des fluides, organisé en 1934 à Lille par Kampé de Fériet, et se retrouvent aux congrès internationaux de mécanique appliquée (ICAM) organisés par von Kármán. Ils partagent le même souci de contribuer au développement de l'industrie aéronautique et hydraulique, tout en maintenant l'exigence d'un progrès général de leur discipline par des recherches de nature plus fondamentale. Ils participent enfin à diverses instances nationales d'organisation de l'enseignement supérieur. Ils partagent donc une même culture scientifique, et sont ouverts aux collaborations. Le rapprochement géographique imposé par la guerre représente donc une opportunité d'ouverture scientifique et d'enrichissement réciproque⁷⁴. Qu'en a-t-il été ?

L'institut de Lille se distinguait à la fin des années 1930 comme le centre français le plus actif pour l'étude de la turbulence, domaine de la mécanique des fluides alors très novateur et dynamique au niveau international. La turbulence pouvait donc constituer un domaine privilégié de collaboration des deux instituts, à l'intersection de l'aérodynamique et de l'hydraulique. En fait, les interactions sont restées très limitées. Elles semblent s'être réduites aux deux conférences de Kampé de Fériet au cours de l'année 1940-1941, citées ci-dessus. Les expériences de diffusion turbulente menées par Frenkiel dans la soufflerie de Banlève, quant à elles, n'ont laissé aucune trace dans les archives toulousaines⁷⁵.

Une raison du peu d'interactions tient sans doute au fait que le programme d'études techniques imposées par le GRA à l'institut de Lille, ne laissait pas de place à

⁷⁴ Charru & Demuro (2022).

⁷⁵ Les archives de l'IMFT ont été en partie détruites après la guerre (témoignage de Serge Bonnefont, responsable de la soufflerie dans les années 1980). On ne peut exclure que certains documents relatifs à des collaborations aient alors disparu. Ces archives ne donnent aucun élément qui permette d'apprécier la nature des relations entretenues avec le GRA ou avec l'occupant.

des collaborations ouvertes. Le caractère clandestin des activités lilloises imposait par ailleurs une grande discrétion, en particulier à partir de l'invasion de la zone libre. Plusieurs courriers de Kampé de Fériet font état de cette clandestinité, comme dans les lignes suivantes écrites après la guerre à des collègues américains :

Après le 11 novembre 1942, il est devenu très dangereux de mener des recherches aéronautiques sans accord allemand ; mais, par bonheur, notre laboratoire était caché dans une vieille église et les Allemands ne nous ont jamais trouvés ; la soufflerie était dans le chœur et l'appareil à fil chaud dans la tribune de l'orgue ; je pourrai un jour vous en envoyer quelques photos. Toulouse était remplie d'Allemands, mais aucun n'a jamais eu l'idée de regarder ce qui se faisait dans cette vieille bâtisse⁷⁶.

La thèse de la clandestinité est également alléguée par le directeur du GRA dans une lettre adressée au personnel de l'institut de Lille dans le mois suivant la libération de Toulouse. On y apprend que Kampé de Fériet a été recherché par le ministère de l'Air du Reich, et que la société d'aérodynamique allemande, la *Lilienthal Gesellschaft*, a ordonné une enquête sur l'activité du GRA ; et que « la légende a fini par s'accréditer qu'à la suite d'une grave maladie, Monsieur Kampé de Fériet avait dû se retirer pour se reposer dans un château des environs de Toulouse ». Cette thèse de recherches poursuivies « à l'insu de l'ennemi » est aussi défendue par Martinot-Lagarde, en 1946, au procès du général Bergeret⁷⁷.

⁷⁶ « After the 11 November 1942 it became very dangerous to do aeronautical researches without the German agreement ; but, by chance, our laboratory was hidden in an old church and the Germans never found them ; the wind tunnel was in the choir and the hot wire apparatus on the organloft ; perhaps, one day, I will send you some pictures of this scenery. Toulouse was full of Germans, but none had the idea to look what was done in this old building. » Lettre de Kampé de Fériet au secrétaire de l'*Institute of Aeronautical Sciences*, 28 nov. 1944. Arch. IMFL, ONERA Lille.

⁷⁷ Procès-verbal de la déposition faite le 26 juillet 1946 par A. Martinot-Lagarde, directeur de l'IMFL. Arch. nat. 3 W 66, « Affaire Bergeret ». Le général Bergeret, secrétaire d'État à l'Aviation de septembre 1940 à novembre 1942, est, à la Libération, inculpé par la Haute Cour de justice d'atteintes à

La clandestinité prétendue pose toutefois question : comment l'activité d'un laboratoire où ont travaillé jusqu'à 80 personnes, avec le bruit des souffleries et les entrées et sorties de gros matériels, a-t-elle pu échapper aux Allemands pendant près de deux années ? Certains services de l'État, de plus, connaissaient l'activité dans la chapelle, et notamment l'inspection du travail de Toulouse comme en témoigne une lettre du directeur du GRA à Kampé de Fériet, à propos du Service du travail obligatoire (STO) et de la réquisition de certains personnels⁷⁸.

6.4.5. Le « laboratoire plat » pour l'hydraulique

L'activité du laboratoire d'hydraulique de l'IET se maintient durant la guerre, soutenue par une forte demande d'hydroélectricité elle-même stimulée par la pénurie de charbon et de combustibles. Escande, nouveau directeur, y consacre toute son énergie, abandonnant la gestion des essais en soufflerie à Sabathé puis à Castex. En août 1942, il sollicite le maire de Toulouse pour une extension du terrain sur l'île du Ramier :

Ces terrains nous sont nécessaires pour l'exécution de nombreuses études sur les modèles réduits d'ouvrages hydrauliques. L'expérience nous a d'ailleurs prouvé que ces modèles doivent être conservés pendant plusieurs années, de façon à permettre d'étudier toutes les modifications susceptibles d'intervenir dans la conception des ouvrages avant que leur réalisation soit achevée⁷⁹.

L'extension demandée, de mille mètres carrés, est située à l'intérieur du terrain concédé en 1920 mais son

la sûreté de l'État. Le procès se conclura en 1948 par un non-lieu. Voir également, dans les archives précitées, les dépositions du président du GRA, le général Dumanois, et de Bergeret lui-même dans sa *Note sur l'activité technique clandestine du secrétariat d'État à l'Aviation à partir de septembre 1940*.

⁷⁸ Le directeur du GRA à J. Kampé de Fériet, 19 mars 1943. Arch. IMFL, ONERA Lille.

⁷⁹ L. Escande au maire de Toulouse, 3 août 1942.

occupation doit faire l'objet d'une demande d'autorisation⁸⁰. Le maire demandant des précisions sur les travaux et expériences envisagés, Escande explique le contexte et détaille les essais en cours :

La pénurie de charbon et d'énergie électrique dont nous souffrons impose à la France un très gros effort dans le domaine de l'équipement des chutes d'eau. Conformément au programme élaboré par le Gouvernement, nous sommes actuellement chargés par des industriels, à la demande des Services du contrôle des Ponts et Chaussées, de l'étude sur modèles réduits d'importants ouvrages d'hydraulique en cours d'exécution ou en projet. Le nombre et l'ampleur de ces modèles réduits exigent d'assez grands espaces que nous ne trouvons plus à l'intérieur de nos limites actuelles. [...]

La parcelle de terrain que nous vous demandons doit nous permettre d'aménager [...] ce que nous appelons notre laboratoire plat. Ce laboratoire plat nous permettra de tenir nos engagements vis-à-vis des Ponts et Chaussées en procédant sans retard à la construction des modèles réduits suivants dont les études doivent être terminées, au plus tard, fin mai prochain :

- Barrage de Luzech sur le Lot ;
- Prise d'eau de Saint-Lary sur la Neste d'Aure ;
- Prise d'eau de Bordes sur le Lez près de St Girons ;
- Vanne de Chastang et galerie de vidange ;
- Étalonnage sur modèle réduit des déversoirs établis dans la région de Causerets ;
- Barrage de Montbrun sur le Lot⁸¹.

L'autorisation d'occupation est donnée en mai 1943 après avis favorable du conseil municipal⁸², augmentant la superficie des laboratoires de Banlève à près de 10 000 m².

⁸⁰ Un avenant du 10 mai 1921 à la convention initiale du 17 mai 1920, stipule que l'occupation de toute parcelle, non encore investie, du terrain concédé, doit faire l'objet d'une demande d'autorisation. Arch. ENSEEIHT.

⁸¹ L. Escande au maire, 25 janv. 1943. Arch. ENSEEIHT.

⁸² Avenant n° 3, du 13 mai 1943, à la convention du 17 mai 1920. Arch. ENSEEIHT.

Le « laboratoire plat » alors aménagé se couvre de modèles réduits d'ouvrages hydrauliques tels que barrages, évacuateurs de crue, et cheminées d'équilibre (dispositif de prévention des coups de bélier dans les conduites). Bien que sans réelle portée scientifique, les études font l'objet de nombreuses publications dans les *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, qu'Escande publie seul. Sa prolifération est telle qu'elle contraint les Secrétaires perpétuels de l'Académie des sciences à intervenir auprès de Camichel qui transmet les notes d'Escande :

Cher Confrère,

Nous vous rappelons que l'article 2 du règlement relatif aux Comptes rendus, dont le texte figure généralement au verso de la couverture, limite à cinq le nombre de Notes qui peuvent être admises, d'un auteur, au cours d'une année.

Nous nous apercevons que, depuis le mois de janvier, vous nous avez adressé quatorze notes de M. Escande. Les neuf premières sont insérées, soit presque le double de ce qui était autorisé. Nous vous renvoyons ci-joint les manuscrits des cinq suivantes qu'il ne nous est pas possible de laisser passer, et nous vous demandons, à l'avenir, de veiller à ce que les auteurs dont vous présentez les Notes restent dans les limites réglementaires⁸³.

Escande publie la même année le premier tome d'un ouvrage d'hydraulique générale, complété en 1948 et 1950 par deux autres tomes⁸⁴.

⁸³ Les Secrétaires perpétuels de l'Académie des sciences à M. Camichel, le 22 oct. 1943.

⁸⁴ Escande (1950).

Chapitre 7

Œuvre scientifique

La vraie définition de la science, c'est qu'elle est l'étude de la beauté du monde.

Simone Weil, *L'enracinement*.

Prélude à une déclaration des devoirs envers l'être humain, 1949

Le plus magique instrument de connaissance, c'est moi-même. Quand je veux connaître, c'est de moi-même que je me sers. C'est moi-même que j'applique, mètre par mètre, sur un pays, sur un morceau de monde, comme une grosse loupe. [...] Tandis que l'invraisemblable romantisme scientifique tend à dominer, donc à s'éloigner, à regarder de haut, [...] l'ordinaire romantisme de tout mon appareil sensuel me pousse à m'accrocher, comme dans la silencieuse pétarade de mille vrilles de viornes ou la gluante succion de poulpe, à joindre, à pénétrer, à m'effondrer dans les choses comme le jaillissement chaud d'un liquide vivant, à perpétuellement redevenir dans le catalogue des formes.

Jean Giono, *Provence*, 1941

Ce chapitre présente un résumé des recherches scientifiques entreprises par Camichel et son équipe au laboratoire d'hydraulique de l'institut électrotechnique, laboratoire intégré en 1930 à l'institut de mécanique des fluides. La période ici considérée couvre les trente années comprises entre 1910, date des premiers contacts avec la Compagnie des chemins de fer du Midi, et 1939 où les recherches s'interrompent quasiment du fait de la guerre et du retrait de Camichel. Les recherches menées après la Seconde Guerre mondiale, dans les domaines de l'hydraulique, de l'électrotechnique et de l'électronique, sont brièvement décrites au chapitre suivant.

7.1. Contexte national et international

Le contexte scientifique dans lequel s'inscrivent, dans l'entre-deux-guerres, les recherches toulousaines est celui d'avancées majeures de la mécanique des fluides, par lesquelles se trouvent réconciliées l'hydraulique des ingénieurs et la mécanique des fluides des « géomètres » établie au milieu du XVIII^e siècle par Jean Le Rond d'Alembert et Leonhard Euler¹. Une de ces avancées est la théorie de la couche limite, élaborée à partir de 1904 par Ludwig Prandtl à Göttingen. Cette théorie distingue, dans les écoulements « rapides » (à grand nombre de Reynolds plus précisément), deux régions bien distinctes : une région éloignée des parois où les effets de la viscosité sont faibles et peuvent être ignorés, et une « couche limite » au voisinage des parois, très fine, où les effets visqueux doivent être pris en compte. Cette théorie résout plusieurs problèmes : elle dénoue le fameux « paradoxe de d'Alembert », permet un calcul de la force de traînée sur un obstacle, et permet de comprendre la génération de la force de portance sur une aile d'avion. Elle ne diffuse cependant que lentement hors de Göttingen et ne s'impose véritablement que dans les années 1920.

Une autre grande avancée porte sur les écoulements turbulents, dont le caractère désordonné, dans le temps et dans l'espace, a longtemps échappé aux méthodes classiques d'étude, tant théoriques qu'expérimentales. Sur le plan théorique, l'analyse progresse avec la décomposition des grandeurs en valeur moyenne et fluctuation, et avec le développement de méthodes statistiques inspirées de celles qui ont été élaborées pour l'étude des mouvements moléculaires (la théorie cinétique des gaz). Les propriétés fortement diffusives de la turbulence commencent ainsi à être comprises, notamment autour de Taylor en Angleterre et Kármán et Prandtl en Allemagne. Ces deux derniers établissent également, à partir de la notion de « longueur de mélange », la nature logarithmique du profil de vitesse moyenne au voisinage d'une paroi. Sur le plan expérimental, une nouvelle technique, la vélocimétrie par fil chaud, ouvre la voie dans les années 1920 à l'enregistrement des signaux turbulents rapidement variables et à l'analyse de leurs corrélations.

¹ Darrigol (2005) ; Eckert (2006) ; Bloor (2011).

Les progrès très brièvement résumés ci-dessus sont essentiellement accomplis en Allemagne, en Angleterre, et, à partir des années 1930, aux États-Unis. Des travaux remarquables sont cependant réalisés en France, notamment autour de Henri Bénard, Charles Camichel, Joseph Kampé de Fériet et Joseph Pérès². Henri Bénard attache ainsi son nom à la convection thermique (la « thermo-convection de Rayleigh-Bénard ») et aux allées tourbillonnaires dans le sillage d'un obstacle (les « tourbillons de Bénard-Kármán »). Joseph Kampé de Fériet, directeur de l'institut de mécanique des fluides de Lille à partir de 1930, engage des recherches originales sur la turbulence atmosphérique et sur la diffusion turbulente, en liaison étroite avec ses collègues étrangers. Joseph Pérès et son associé Lucien Malavard font des méthodes rhéoelectriques un véritable outil de calcul analogique préfigurant le futur calcul numérique sur ordinateur. Charles Camichel, dont les recherches font l'objet de ce chapitre, met au point des techniques élaborées de visualisation des écoulements et engage une réflexion originale sur la similitude des écoulements et l'analyse dimensionnelle.

7.2. Hydraulique des barrages et conduites forcées

L'intérêt de Camichel pour l'hydraulique et la mécanique des fluides trouve son origine, comme indiqué précédemment, dans l'essor de l'hydroélectricité pyrénéenne. Sollicitées par la Compagnie des Chemins de fer du Midi, des études sont entreprises à partir de 1910 et leur envergure conduit à la création, en 1913, du Laboratoire d'hydraulique de l'université de Toulouse.

7.2.1. Ondes dans les conduites

Les « coups de bélier ». Le premier problème posé par la Compagnie du Midi est celui des « coups de bélier » dans les conduites forcées qui acheminent l'eau des barrages d'altitude vers les usines hydroélectriques – notamment

² Charru (2021) ; Charru (2023).

l'usine de Soulom à la confluence des gaves de Pau et Cauterets. Dans un ouvrage de synthèse des expériences réalisées, publié en 1918 avec les ingénieurs Denis Eydoux et Maurice Gariel, Camichel en pose ainsi les enjeux :

On appelle coup de bélier, 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 mm².³

Le problème a été abordé antérieurement par Nicolai Joukovski et Lorenzo Allievi⁴. Ce dernier a ainsi établi en 1902 le système d'équations différentielles gouvernant la propagation des ondes de pression dans une conduite, et a publié en 1913 une méthode de résolution analytique et graphique devenue une référence. Comme l'indique Camichel, « on peut résumer, en un mot, le résultat fondamental auquel on arrive : l'étude des coups de bélier se ramène à l'équation de d'Alembert des cordes vibrantes. » Des expériences précises restent cependant à entreprendre pour cerner la validité des hypothèses du calcul.

Nous nous sommes attachés, poursuit Camichel, 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] (Souлом), répartie en deux chutes distinctes ayant respectivement 120 mètres et 250 mètres de hauteur. [...]

³ Camichel *et al.* (1918).

⁴ Rouse & Ince (1957).

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 bélier.

Ces études, « plus de trois mille expériences distinctes », font l'objet des deux premières thèses de doctorat ès sciences du laboratoire, de Denis Eydoux (1919) et Adrien Foch (1920)⁵. Ces études sont également publiées dans les *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, dans la revue *La Lumière électrique*, et font l'objet de l'ouvrage de synthèse mentionné plus haut et distingué par le prix Boileau de l'Académie des sciences. Paul Painlevé, titulaire de la première chaire de mécanique des fluides à la Sorbonne, invite Camichel pour y professer des *Leçons sur les conduites* qui seront publiées⁶.

Mesures de pression et de débit. Les mesures de pression, essentielles à l'analyse du problème, sont réalisées par différents types de manomètres-enregistreurs. Le principe de ces instruments repose sur le déplacement, par la pression de l'eau, d'un piston dont les mouvements sont amplifiés par un système articulé et enregistrés sur un cylindre tournant enduit de noir de fumée. Des manomètres « utilisant la déformation d'une plaque téléphonique » sont également employés, parfois associés à la photographie. Une grande attention est portée au temps de réponse du manomètre (qui doit être aussi court que possible) et à la perturbation introduite par l'instrument (la variation de volume liée au déplacement de la partie mobile du manomètre doit rester petite devant celle liée à la compressibilité de l'eau).

⁵ Cf. Annexe A pour les références des thèses.

⁶ Camichel (1930).

Une mesure différentielle de pression permet la détermination de la vitesse de l'eau dans un « jaugeur Venturi ». Camichel montre qu'un tel instrument, d'usage courant en laboratoire, est aussi précis et fiable dans les conduites industrielles de gros diamètre. Ce travail fait l'objet des premières publications scientifiques de l'IET, dans *La Lumière électrique*, aux *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, et dans les actes du *Congrès de la Houille Blanche* de 1914 (le congrès lui-même, programmé en septembre, sera annulé du fait de la déclaration de guerre mais ses actes seront publiés)⁷.

Détermination de la vitesse de l'onde. La vitesse de l'onde de pression est déduite de son temps de parcours sur une distance connue, par la « méthode de la dépression brusque »⁸ :

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, réfléchi 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.

La Figure 7.1 montre un tel enregistrement pour une expérience typique. La vitesse mesurée vaut 1312 m/s, correspondant à celle que donne la théorie d'Allievi (1315 m/s). Une difficulté de l'expérience est liée à la possible présence d'air piégé dans les cavités internes de la conduite (dans la partie supérieure des robinets-vannes, dans les rivures, etc.), air qu'il faut préalablement purger.

⁷ Camichel *et al.* (1914*a,b*, 1915).

⁸ Camichel (1915, 1916*b,a*).

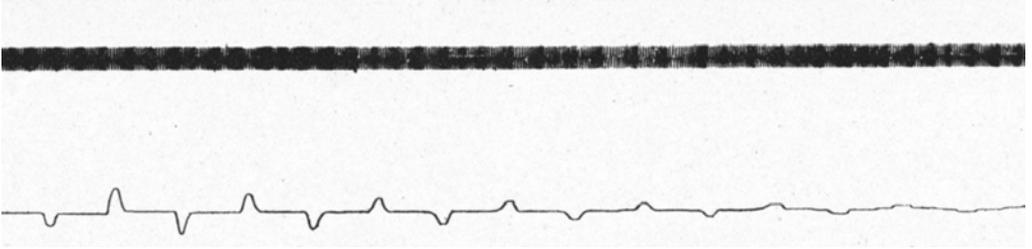


Figure 7.1 Trace inférieure : variation au cours du temps de la pression dans une conduite, consécutive à la brève ouverture d'un petit robinet à l'aval (méthode de la dépression brusque) ; trace supérieure : enregistrement des vibrations d'un diapason au 1/100 s donnant l'échelle de temps (Camichel *et al.*, 1918).

Résonances. Lorsqu'une conduite est soumise à une perturbation périodique, par exemple une modulation du débit réalisée par un robinet tournant, des résonances intéressantes se manifestent. La plus forte apparaît sur le mode fondamental (la conduite vibre en $1/4$ d'onde), d'autres font intervenir les harmoniques.

Au moment de la résonance, remarque ainsi Camichel, l'oscillation s'épure et la courbe devient sinusoïdale ; 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.

Conduites à caractéristiques multiples. Les conduites industrielles sont en général constituées de plusieurs tronçons d'épaisseurs et parfois de diamètres différents, possédant chacun sa propre vitesse de propagation. Sur une telle conduite « à caractéristiques multiples », la variation de pression en un point, consécutive à la manœuvre d'une vanne ou d'un distributeur, s'en trouve compliquée. La Figure 7.2 montre la variation engendrée par la fermeture lente d'un distributeur, au pied d'une conduite modélisée, pour le calcul, avec trois tronçons. Le calcul, qui associe solutions analytiques et résolution numérique « à la main » par différences finies, reproduit remarquablement bien les mesures.

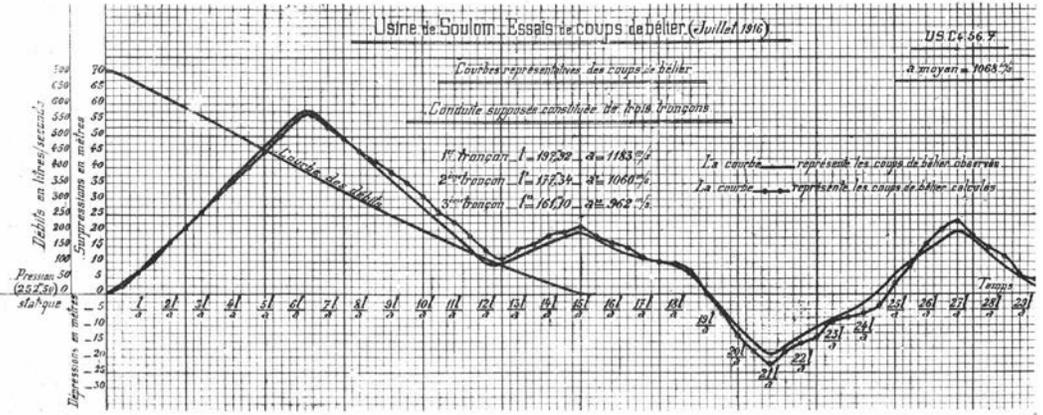


Figure 7.2 Évolution temporelle de la pression, mesurée et calculée, au pied d'une conduite « à caractéristiques multiples » (usine du Souлом), lors de la fermeture lente du distributeur (Camichel *et al.*, 1918).

7.2.2. Évacuateurs de crues

Les déversoirs de barrages et les évacuateurs de crues font l'objet de nombreuses études ordonnées par la Compagnie du Midi et par le ministère des Travaux publics. L'étude sur modèle réduit de l'évacuateur de crues du barrage de Sarrans, sur la Truyère (Aveyron), révèle en particulier un intéressant phénomène d'intermittence⁹.

Cet évacuateur, schématisé sur la Figure 7.3a, associe un déversoir et un canal souterrain à forte pente reliés par une chambre d'eau.

Le canal souterrain, explique Camichel, fonctionne à écoulement libre pour des débits faibles, et en charge pour des débits élevés. Le passage d'un mode de fonctionnement à l'autre peut s'effectuer, dans certains cas, d'une manière progressive et sans aucune singularité ; mais, le plus souvent, il n'en est pas ainsi et l'on observe des phénomènes alternatifs ; l'ouvrage fonctionne, tantôt comme un barrage déversoir, tantôt comme une chambre d'eau suivie d'une conduite forcée¹⁰.

⁹ Camichel *et al.* (1931a).

¹⁰ Camichel (1931).

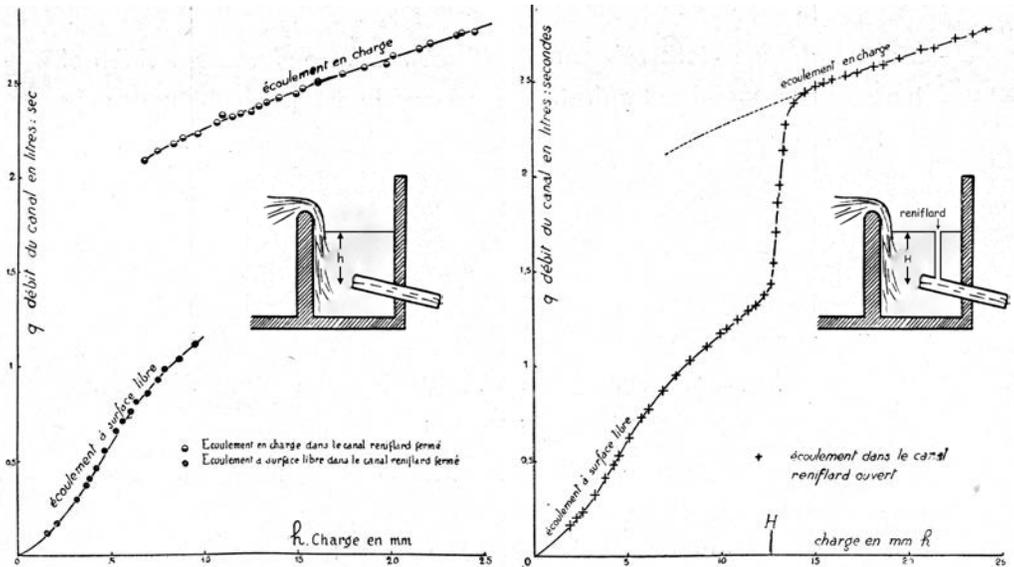


Figure 7.3 Débit d'un évacuateur de crues (modèle réduit) en fonction de la charge h au-dessus de l'entrée du canal souterrain ; (a) sans reniflard ; (b) avec un reniflard de hauteur H au-dessus de l'entrée du canal (Camichel *et al.*, 1931a).

La Figure 7.3a montre que pour les hauteurs de charge h entre 7 et 10 mm, il existe en effet deux débits possibles selon que l'écoulement dans le canal souterrain est en charge ou à surface libre, d'où le régime alternatif clairement expliqué dans la publication.

Ce phénomène alternatif est particulièrement dangereux pour l'ouvrage, en raison des chocs et variations de pression brusques et violents qu'il provoque. Nous avons montré qu'on peut l'éliminer au moyen d'une cheminée d'aération.

Cette cheminée d'aération – encore appelée « reniflard » –, schématisée sur la Figure 7.3b, supprime l'hystérésis et régularise la courbe de débit. Le mécanisme de l'intermittence une fois compris, l'étude permet l'interprétation de phénomènes naturels plus généraux, « par exemple les variations de débit que l'on observe parfois dans les cours d'eau souterrains. »

7.3. Similitude des écoulements

L'expérimentation sur un ouvrage industriel ne permet pas, en général, de bien contrôler les phénomènes physiques en jeu, difficulté qu'une étude sur un modèle réduit permet de contourner. La transposition à l'ouvrage des résultats obtenus sur son modèle requiert que les deux écoulements soient « dynamiquement semblables », c'est-à-dire que l'importance relative des phénomènes (viscosité, gravité, etc.) soit la même dans l'ouvrage et dans le modèle. Il existe alors, entre tout point de l'ouvrage et son point homologue du modèle, des « relations de similitude » bien définies entre grandeurs physiques (vitesses, pressions, forces, etc.). Ces relations font intervenir le rapport λ des dimensions de l'ouvrage et de son modèle, mais aussi, possiblement, d'autres rapports tel que celui des viscosités ou celui des densités des fluides.

7.3.1. Lois de similitude

Les conditions générales de similarité dynamique ont été établies au XIX^e siècle par Joseph Fourier (1822) et ensuite précisées théoriquement, sur la base des équations de Navier-Stokes, par Hermann Helmholtz (1873) et Lord Rayleigh (1892)¹¹. Osborne Reynolds (1842-1912) s'est fondé sur ces idées pour analyser ses propres expériences sur la transition à la turbulence en conduite, et déterminer, en 1883, un critère général de transition faisant intervenir un rapport de dimensions devenu le « nombre de Reynolds ». Une dizaine d'années auparavant, Ferdinand Reech puis William Froude avaient déterminé empiriquement les relations de similitude pour la résistance à l'avancement des navires. Ces travaux ont été repris et développés en France par Joseph Boussinesq, Marcel Brillouin et Émile Jouguet¹².

Les relations de similitude sont liées au type d'écoulement considéré, elles ne sont pas les mêmes selon que l'écoulement est à surface libre ou en charge, qu'il

¹¹ Lamb (1932, § 365-371) ; Rouse & Ince (1957, p. 213) ; Darrigol (2005, p. 256, 277).

¹² Jouguet (1924) ; Camichel (1925*c,a,b*).

est laminaire ou turbulent, etc. Cette question occupe Camichel dès ses premières études sur les coups de bélier et devient dans les années 1920 le fil conducteur des travaux du laboratoire d'hydraulique toulousain. Au-delà de la motivation industrielle, la question permet d'accéder à une compréhension plus profonde de l'hydrodynamique ainsi que l'explique Camichel :

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 représenter¹³.

C'est à une réflexion et à des expériences sur cette question qu'est consacrée la thèse de Léopold Escande¹⁴.

En collaboration avec M. L. Escande, indique Camichel, j'ai étudié, du point de vue de la similitude, les modes d'écoulement les plus divers : chambres d'eau, déversoirs, conduites, collecteurs, corps immergés. 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.

¹³ Camichel (1929, p. 28).

¹⁴ Cf. Annexe A. La thèse est publiée la même année sous la forme de quatre articles dans la *Revue Générale d'Électricité* (Escande, 1929).

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 Reynolds¹⁵.

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 lenteur¹⁶ ». Ils permettent aussi la mise en évidence de seuils vis-à-vis du nombre de Reynolds.

Les premières expérimentations réalisées à Toulouse portent sur la comparaison des vitesses – mesurées par chronophotographie – de l'écoulement autour d'obstacles géométriquement semblables, ou sur la comparaison des débits de deux écoulements visqueux dans des conduites de diamètres différents (dans un rapport $D_2/D_1 = \lambda$)¹⁷. Autre mise en œuvre du concept de similitude, le caractère potentiel (ou irrotationnel) d'un écoulement peut être testé par la vérification de la condition correspondante. Dans un réservoir percé d'un orifice en mince paroi, par exemple, un écoulement d'eau et un écoulement d'huile doivent, s'ils sont potentiels, présenter des durées de vidange identiques. La question de la chute de pression Δp dans un coude fait l'objet d'une étude détaillée. Pour un fluide de masse volumique ρ et de vitesse moyenne V , l'analyse dimensionnelle montre que le coefficient sans dimension

$$\varphi = \frac{\Delta p}{\rho V^2} \quad (7.1)$$

ne doit dépendre que du nombre de Reynolds $Re = VD/\nu$ (où ν est la viscosité cinématique du fluide). La Figure 7.4 montre des mesures $\varphi(Re)$ pour deux coudes à angle droit et quatre liquides différents – dont les viscosités extrêmes

¹⁵ Camichel (1931, p. 21).

¹⁶ Camichel (1935a, p. 32).

¹⁷ Camichel & Escande (1923); Escande & Ricaud (1925b,a).

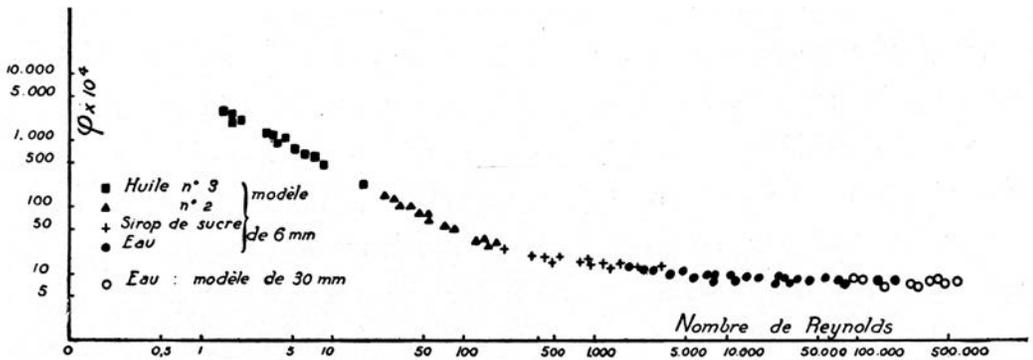


Figure 7.4 Coefficient $\varphi = \Delta p / \rho V^2$ en fonction du nombre de Reynolds VD/ν pour deux coudes à angle droit et quatre liquides différents. Le rapport des viscosités extrêmes est de 373. (Camichel, 1931).

sont dans un rapport 373. Il apparaît en premier lieu que les points correspondant aux différentes situations s'alignent bien sur une même courbe. On voit ensuite que le coefficient φ décroît comme Re^{-1} pour les nombres de Reynolds inférieurs à 500 environ, puis, au-delà de cette valeur, conserve une valeur sensiblement constante. La décroissance en Re^{-1} correspond à un régime dominé par les effets visqueux, tandis que le palier correspond à un régime dominé par l'agitation turbulente – pertes de charge « à la Borda » proportionnelles au carré de la vitesse¹⁸. Chacun des deux régimes possède ses propres relations de similitude entre grandeurs physiques (vitesse ou pression) en des points homologues.

7.3.2. Similitude des « ouvrages courts »

L'existence d'un régime où le coefficient φ est indépendant du nombre de Reynolds (lorsque ce nombre est suffisamment grand) est particulièrement importante dans la perspective de l'extrapolation à un ouvrage réel des mesures obtenues sur son modèle réduit. Dans ce régime en effet, correspondant à des ouvrages qualifiés par Camichel d'« ouvrages courts »,

[...] les pertes de charge, variant suivant le carré de la vitesse comme toutes les autres pressions,

¹⁸ Camichel (1925*c,a,b*) ; Camichel *et al.* (1931*b*).

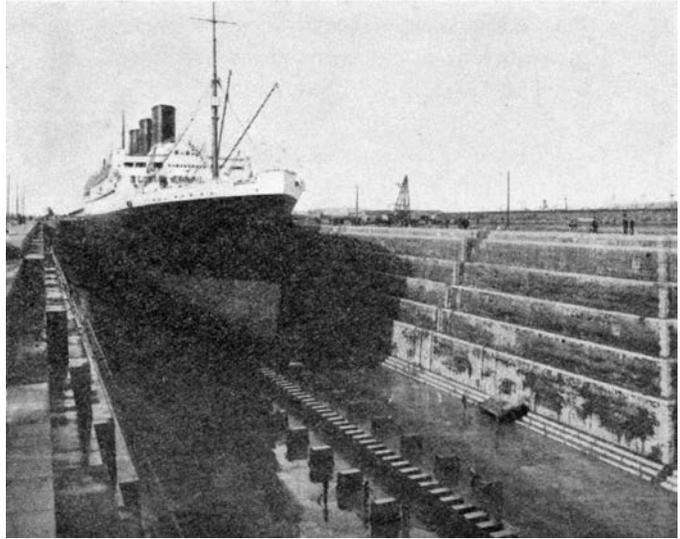


Figure 7.5 Cale de radoub du port du Havre. Longueur : 313 m, débit lors du remplissage : $100 \text{ m}^3/\text{s}$; puissance mise en jeu : 11 MW (Camichel & Escande, 1938).

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 : $\varphi(Re)$ 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 méthode¹⁹.

Une étude emblématique illustrant ces considérations est celle du remplissage de la cale de radoub du port du Havre (Figure 7.5)²⁰. Cette cale, d'une longueur de 335 mètres, « l'une des plus grandes existant dans le monde », est remplie par gravité depuis la mer, à marée

¹⁹ Camichel (1929, p. 34).

²⁰ Camichel *et al.* (1932) ; Camichel (1935a, p. 27).

haute, au travers d'aqueducs parcourus par des débits de l'ordre de $100 \text{ m}^3/\text{s}$. Une analyse dimensionnelle montre que cet écoulement à surface libre doit satisfaire la loi de similitude de Reech-Froude (vitesses proportionnelles à la racine carrée des dimensions géométriques), indépendamment du nombre de Reynolds si l'ouvrage se comporte bien comme un « ouvrage court ». La Figure 7.6a compare les hauteurs de remplissage mesurées pour l'ouvrage réel et pour un modèle, à l'échelle $1/25 = 1/\lambda$, installé dans le canal courbe de Banlève. Le temps et la hauteur pour le modèle étant ramenés à ceux de l'ouvrage par multiplication par $\sqrt{\lambda}$ et λ , respectivement, la coïncidence des points de mesure confirme la similitude attendue. Un écart apparaît cependant à la fin du remplissage, où la hauteur dans le modèle augmente plus lentement que dans l'ouvrage. Le tracé de la fonction $\varphi(Re)$ des aqueducs (Figure 7.6b) permet d'interpréter cet écart : en fin de remplissage où la vitesse de l'écoulement diminue, le nombre de Reynolds Re passe en deçà d'un certain seuil et la fonction $\varphi(Re)$ n'est plus constante (la viscosité alors intervient et freine l'écoulement). On peut noter, sur la

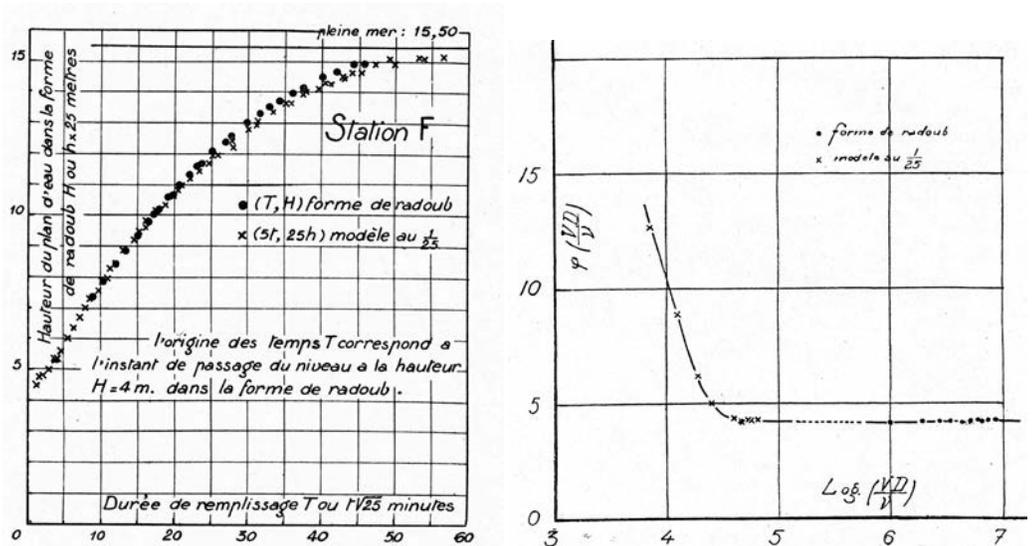


Figure 7.6 Cale de radoub du port du Havre : (a), hauteur de remplissage en fonction du temps pour l'ouvrage réel et pour son modèle réduit à l'échelle 1/25 ; (b), fonction $\varphi(Re)$ (Camichel, 1935a).

figure, l'étendue de la gamme des nombres de Reynolds explorés (plus de trois ordres de grandeur), jusqu'à des valeurs, selon Camichel, encore jamais explorées.

Une condition de réalisation de la similitude est que la rugosité des parois des aqueducs – autre paramètre géométrique du problème – n'intervienne pas, ce qui est bien le cas ici. Dans d'autres expériences au contraire – sur un collecteur de l'usine hydroélectrique de Miègebat –, il est apparu que des rugosités importantes affectent la similitude. Deux autres conditions de similitude sont l'absence de cavitation et l'absence de déferlement de la surface libre – phénomènes apparus dans une étude de passes à poissons, et faisant intervenir leurs échelles propres.

7.3.3. Résistance à l'avancement de corps tombants

La question de la résistance à l'avancement d'un obstacle dans un écoulement reste dans les années 1930 largement ouverte²¹. La théorie des surfaces de discontinuité de Helmholtz et Levi-Civita, qui avait permis de contourner le paradoxe de d'Alembert, a montré ses limites, et la théorie de la couche limite de Prandtl, bien plus riche et prometteuse, se heurte néanmoins à des difficultés de calcul. Du point de vue des applications, la force de traînée reste donc essentiellement déterminée par des considérations de similitude complétées par des expériences bien choisies.

C'est dans ce contexte qu'en 1931 Camichel engage Jean Baubiac, boursier du ministère de l'Air, dans une thèse sur le mouvement d'un corps tombant par gravité dans un fluide au repos²². Les corps étudiés sont des cylindres tombant parallèlement à leur axe de symétrie et munis d'un empennage stabilisant leur trajectoire verticale. La chute de corps de diamètre centimétrique est étudiée dans le laboratoire du boulevard Riquet (cf. chap. 5). Un fil attaché au corps entraîne en rotation un tambour situé en haut du bassin, tambour filmé par une caméra rapide à 250 images par seconde. Le dépouillement du film permet de déterminer la loi $V(t)$ de la vitesse de chute – la vitesse

²¹ Goldstein (1969).

²² Cf. Annexe A.

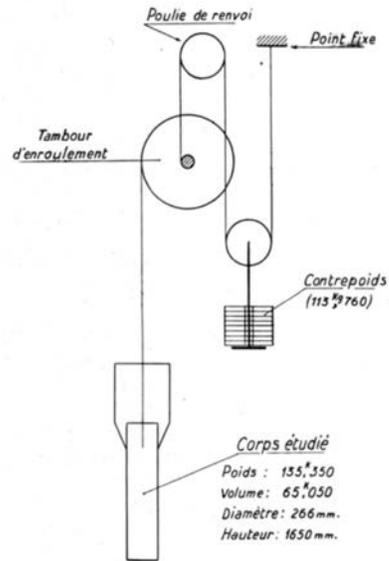


Figure 7.7 Radeau des expériences du lac d'Oô (80 mètres de profondeur) et schéma de la machine d'Atwood permettant la variation du poids apparent de l'obstacle (et donc de sa vitesse terminale) (Baubiach, 1936).

croît puis se stabilise. Ces expériences de laboratoire sont complétées, pour des corps de grandes dimensions, par des expériences au lac d'Oô, lac pyrénéen profond de 80 mètres (Figure 7.7). Le radeau à partir duquel celles-ci sont menées, 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 (poids diminué de la force d'Archimède et de la force due au contrepoids).

Lorsque le régime établi est atteint, la vitesse V est constante et la résistance hydrodynamique est alors égale au poids apparent. La Figure 7.8 montre cette résistance, normalisée par le produit SV^2 (où S est la section du corps), en fonction du nombre de Reynolds Re du corps. Il apparaît que pour $Re \geq 50\,000$, la force normalisée est constante (indépendante du nombre de Reynolds), confirmant que « le phénomène considéré est indépendant de la viscosité propre du liquide ».

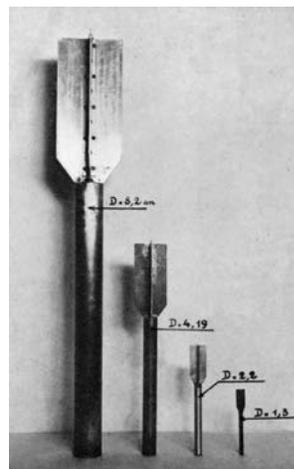
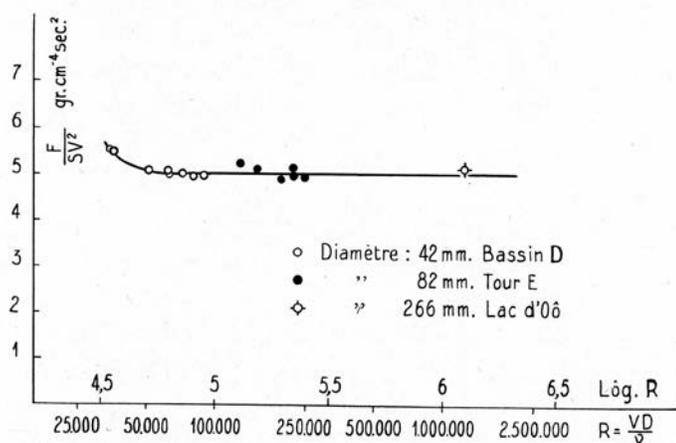


Figure 7.8 Résistance hydrodynamique d'un cylindre chutant à vitesse constante dans l'eau en fonction des nombres de Reynolds ; photographie des cylindres (hors le plus gros) (Baubiac, 1936).

Dans le régime transitoire d'accélération, la force hydrodynamique – qui n'est plus égale au poids apparent – est déterminée à partir des mesures de vitesse et du principe fondamental de la dynamique. La Figure 7.9 montre les variations, au cours du temps, de cette force et de la vitesse du corps, et montre également, à des instants où la vitesse est V , la valeur de la force mesurée dans un mouvement *uniforme* à cette même vitesse V (contrôlée par la machine d'Atwood). Il apparaît que la force dans le mouvement accéléré est supérieure à ce qu'elle est dans un mouvement uniforme à la même vitesse. Le surcroît de force est lié au fait que le fluide autour de l'obstacle est lui-même accéléré – phénomène dont on peut rendre compte, comme discuté dans l'ouvrage de Lamb²³, en ajoutant à la masse du corps, dans l'équation du mouvement, une certaine masse de fluide ne dépendant que de la géométrie du corps.

Certaines échelles caractéristiques de l'écoulement vérifient aussi les relations de similitude. C'est ici le cas pour la distance parcourue par le corps avant qu'il ait atteint sa vitesse terminale :

les expériences ont montré que la distance L parcourue par le corps depuis la position initiale jusqu'à la

²³ Lamb (1932, chap. v).

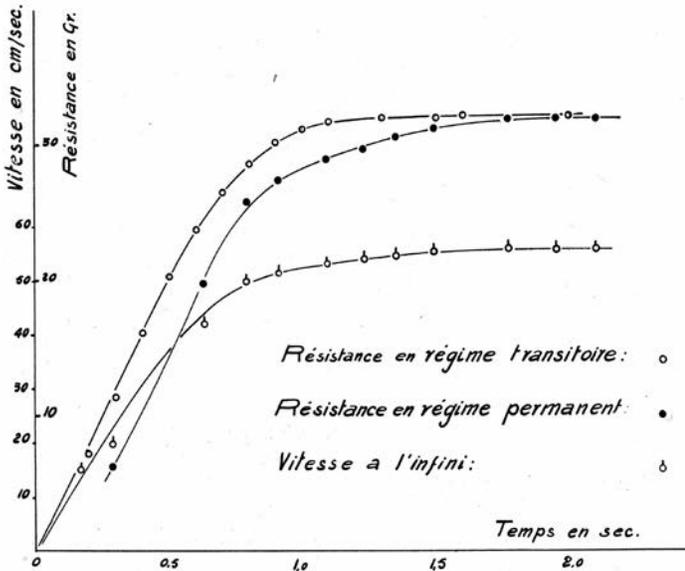


Figure 7.9 Vitesse et résistance hydrodynamique au cours du régime transitoire d'accélération, et résistance (plus faible) dans un régime établi de même vitesse constante (Baubiac, 1936).

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]²⁴.

7.4. Hydraulique fluviale

Les fleuves sont le siège d'une grande variété de phénomènes hydrauliques naturels (crues, transport de sédiments) ou liés à l'activité humaine ; parmi ces derniers on peut citer les contractions d'écoulement provoquées par les piles de ponts, le décollement d'une lame déversante au-dessus du parement aval d'un barrage, ou, sur un fond sableux, l'affouillement ou le remblaiement à l'aval d'un ouvrage. Ces phénomènes font l'objet, au laboratoire toulousain, de nombreuses études réalisées en relation avec les services techniques de l'État ou avec

²⁴ Camichel (1935a, p. 21).

l'industrie hydroélectrique. On présente ici quelques observations sur les effets produits, dans un écoulement, par un élargissement brusque ou par un barrage composé d'éléments mobiles. Les enjeux portent sur la protection des rives des cours d'eau ou sur l'amélioration des conditions de navigation.

7.4.1. Veine liquide débouchant dans un élargissement brusque

Considérons une veine liquide de section rectangulaire débouchant dans une cavité plus large. Plusieurs configurations peuvent en résulter, comme illustrées par la Figure 7.10 pour un écoulement visqueux de laboratoire.

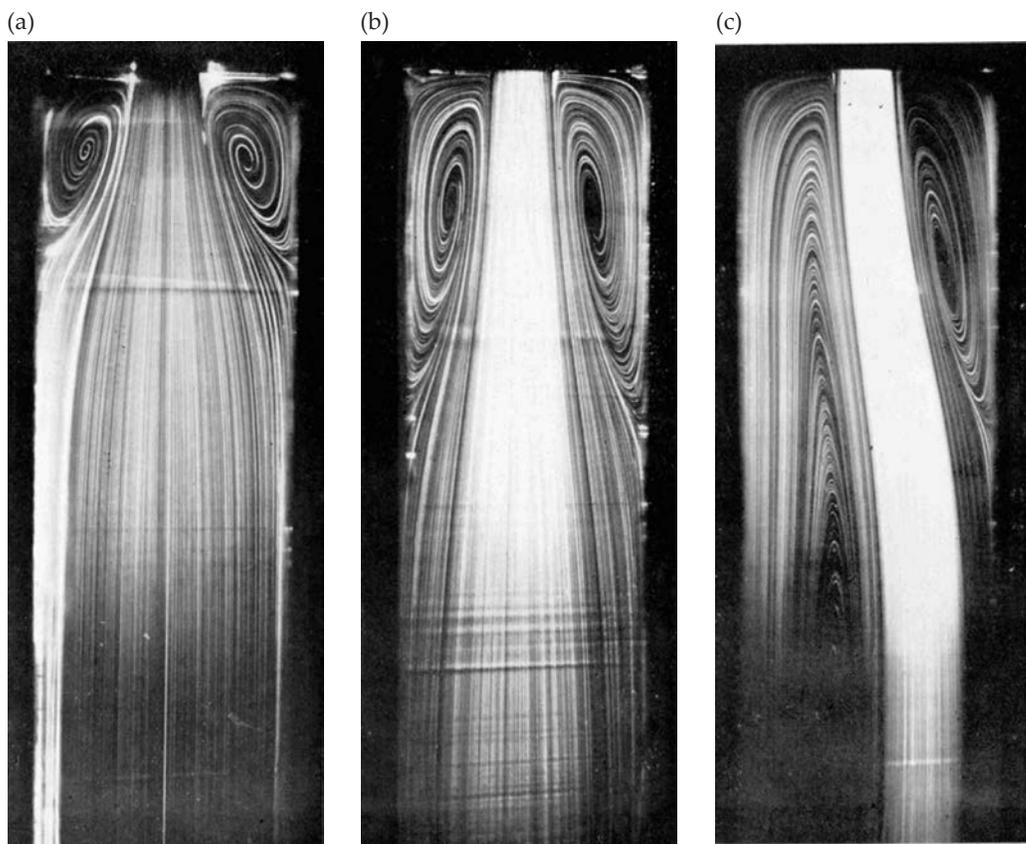


Figure 7.10 Écoulements visqueux débouchant dans un élargissement brusque. La symétrie observée à petit nombre de Reynolds (a, b) est perdue pour $Re > 34$ (c), la veine s'orientant alors vers l'une ou l'autre des parois latérales (Camichel, 1935a).

En-deçà d'un certain seuil de vitesse, l'écoulement est symétrique (Figure 7.10a, b) ; au-delà du seuil, cet écoulement est instable et la veine s'incurve vers l'une ou l'autre des parois latérales (Figure 7.10c). On observe ainsi, explique Camichel,

[...] 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'accroît 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. Pour des vitesses plus grandes, on voit apparaître de part et d'autre de la veine qui débouche du canal *T* deux rouleaux logés symétriquement dans les angles amont de la section élargie (Figure 7.10a, b). 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 dimensions²⁵.

Le fil en question, placé juste à l'aval de l'élargissement, peut être déplacé transversalement dans la veine. Une augmentation progressive de la vitesse de l'écoulement, par l'ouverture lente d'un robinet, conduit aux observations suivantes.

Nous avons constaté que pour les nombres de Reynolds très faibles, le fil n'a pas d'action. Au voisinage du critérium [$Re_c = 34$] et dans des limites restreintes, il est possible en déplaçant le fil de a en b [de la paroi droite vers le centre] 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 Reynolds 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.

Ces études, qui montrent que les grandes structures d'un écoulement peuvent être manipulées par de petites perturbations, font de Camichel et de ses collaborateurs des pionniers, peut-on dire, de ce qu'on appelle aujourd'hui le « contrôle des écoulements » !

²⁵ Camichel (1935*b*, p. 3-5).

7.4.2. Écoulements à surface libre

Les observations précédentes correspondent à un écoulement en charge, dans une conduite fermée. Des phénomènes du même type se produisent dans les écoulements à surface libre, et pour des nombres de Reynolds bien plus élevés²⁶.

Les mêmes phénomènes, poursuit Camichel, 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 Banlève), 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 [tangemment à la veine] à 2 mètres à l'aval de la fente, dès le début du mouvement (Figure 7.11). 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. [...]

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 mettent en jeu une puissance

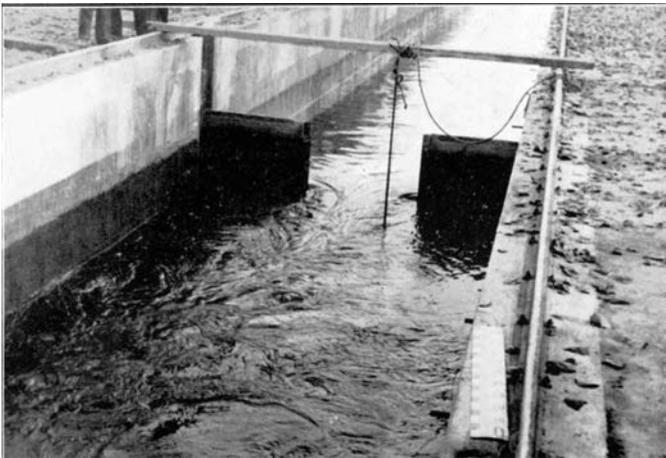


Figure 7.11 Une tige de petit diamètre juste à l'aval d'un élargissement brusque, dans le canal de Banlève, permet d'imposer l'orientation de la veine d'eau vers l'une ou l'autre des parois latérales, levant ainsi l'indétermination de cette orientation (Camichel, 1935a).

²⁶ Camichel *et al.* (1935a).

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. [...]

On voit donc qu'une cause infime mais existant 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 transitoire²⁷.

7.4.3. Expériences au barrage de Vives-Eaux

Les changements d'orientation de veines fluides mis en évidence en laboratoire se retrouvent en hydraulique fluviale, comme illustré par des expériences réalisées sur le barrage de Vives-Eaux, sur la Seine (Figure 7.12), et sur son modèle à l'échelle 1/25, au laboratoire de Banlève²⁸. 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. »



Figure 7.12 Veines convergentes à l'aval du Barrage de Vives-Eaux sur la Seine (Camichel, 1935a).

²⁷ Camichel (1935b, p. 7).

²⁸ Camichel *et al.* (1935c,b).

Ouverture unique. Dans le cas d'une ouverture unique proche de l'une des rives, on observe ainsi que la veine s'incurve vers cette rive. Si l'ouverture est située dans la partie centrale, « la veine ne demeure jamais dans l'axe de l'ouverture mais s'incurve toujours vers l'une ou l'autre des deux rives. » L'orientation d'un côté ou de l'autre peut être forcée en déplaçant progressivement la passe ouverte de la rive choisie vers la partie centrale. À une même position centrale de l'ouverture peuvent ainsi correspondre deux orientations différentes de la veine, selon la procédure suivie 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.²⁹.

Deux ouvertures. Dans le cas de deux ouvertures *A* et *B*, schématisé sur la Figure 7.13, un nouveau phénomène devient possible : l'attraction et la réunion des deux veines. Ce phénomène apparaît en particulier lorsque les deux ouvertures sont proches l'une de l'autre :

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.

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

²⁹ Camichel (1935*b*, p. 9).

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*³⁰.

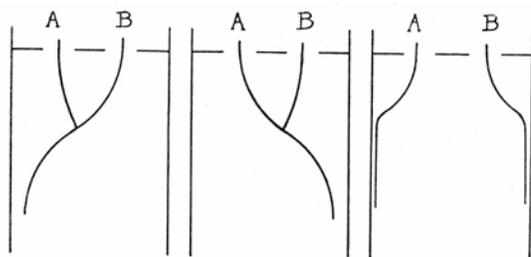
Lorsque les deux ouvertures sont situées à proximité des parois, alors l'attraction des parois domine l'attraction des veines entre elles, comme représentée sur le schéma de droite de la Figure 7.13.

Pour des ouvertures *A* et *B* ni trop proches des parois, ni trop proches l'une de l'autre, l'attraction des parois équilibre sensiblement l'attraction mutuelle des veines et les trois configurations sont possibles. Un système de tiges convenablement placées permet, en utilisant le régime transitoire, de lever l'indétermination et d'obtenir la configuration voulue, comme le montre la Figure 7.14.

La situation d'un fond affouillable, de sable fin par exemple, introduit une différence importante avec ce qui précède : la configuration d'équilibre final est symétrique et indépendante de l'état initial du lit. Ainsi, un talus disposé en dehors du plan de symétrie de l'écoulement est progressivement érodé, et un fond symétrique est finalement restauré³¹.

Ces travaux sur les solutions multiples en hydraulique trouvent plusieurs prolongements. L'un d'eux porte sur les écoulements oscillants, induits par exemple par une marée, où l'orientation de la veine à l'aval d'une contraction est sensible aux tourbillons résiduels formés lors de l'alternance précédente. Un autre prolongement consiste à utiliser les crues d'une rivière, par l'aménagement naturel ou artificiel de son lit majeur, pour modifier son lit mineur – celui dans lequel elle retourne après la décrue.

Figure 7.13 Schémas des trois configurations possibles résultant de l'ouverture de deux vannes : confluence des deux veines vers la rive droite, confluence vers la rive gauche, ou divergence des veines (Camichel, 1935a).



³⁰ Camichel (1935b, p. 10).

³¹ Camichel & Escande (1934).

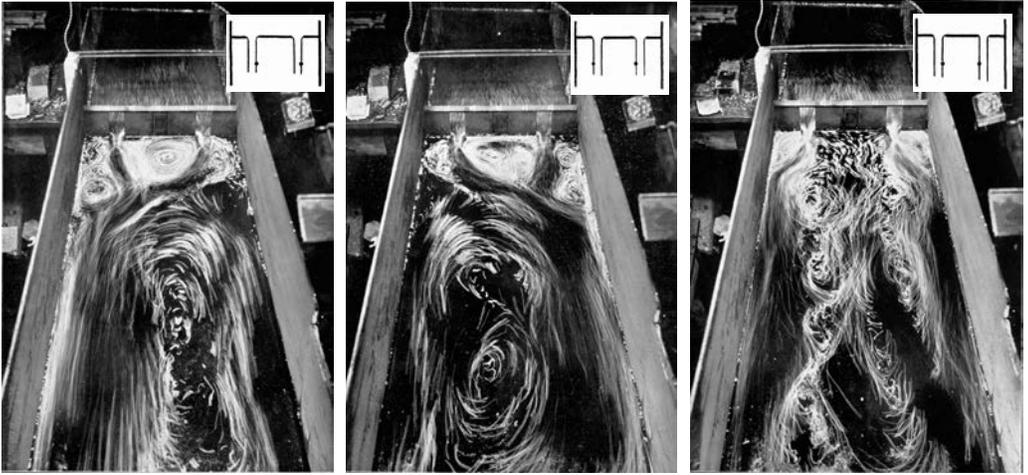


Figure 7.14 Écoulements correspondant aux schémas de la Figure 7.13 ; ces écoulements peuvent être obtenues de diverses façons, notamment à l'aide de tiges disposées comme indiqué dans l'insert en haut à droite de chaque photographie (Camichel, 1935a).

7.5. Chronophotographie et cinématographie

Les premières mesures de vitesse d'écoulement réalisées au laboratoire d'hydraulique étaient faites au classique tube de Pitot. Cet instrument présente cependant plusieurs limitations : il ne donne la vitesse qu'en un point, sa résolution spatiale est au mieux de quelques millimètres, l'inertie des manomètres filtre les variations rapides, et le tube perturbe l'écoulement. Une nouvelle technique optique affranchie de ces limitations, et fondée sur la photographie du déplacement de fines particules entraînées par l'écoulement, est développée à partir de 1918 par Camichel : la chronophotographie.

7.5.1. Principe

Dans sa première publication sur le sujet, en 1919, Camichel cite les travaux antérieurs de John Scott Russell, Anatole de Caligny, Joseph Boussinesq et Étienne-Jules Marey, puis décrit brièvement la méthode et l'applique à diverses configurations : écoulement d'eau entre deux glaces

planes, mouvement giratoire de vidange d'une chambre d'eau percée à sa base, ou écoulement sur un déversoir à surface libre³². Pour l'écoulement entre deux glaces,

[...] 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.

Dans la publication suivante, la méthode est décrite plus précisément :

[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.

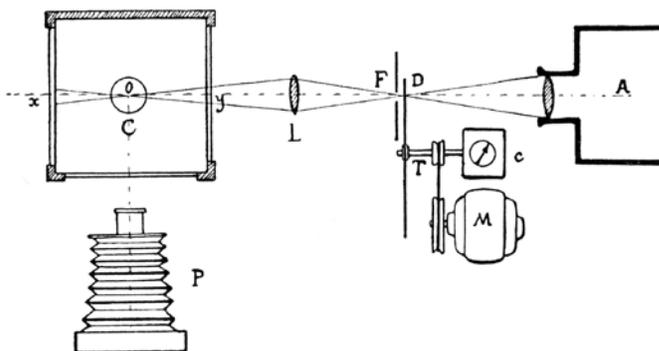


Figure 7.15 Schéma du montage de la méthode chronophotographique (Camichel, 1920*d*).

³² Camichel (1919*b*).

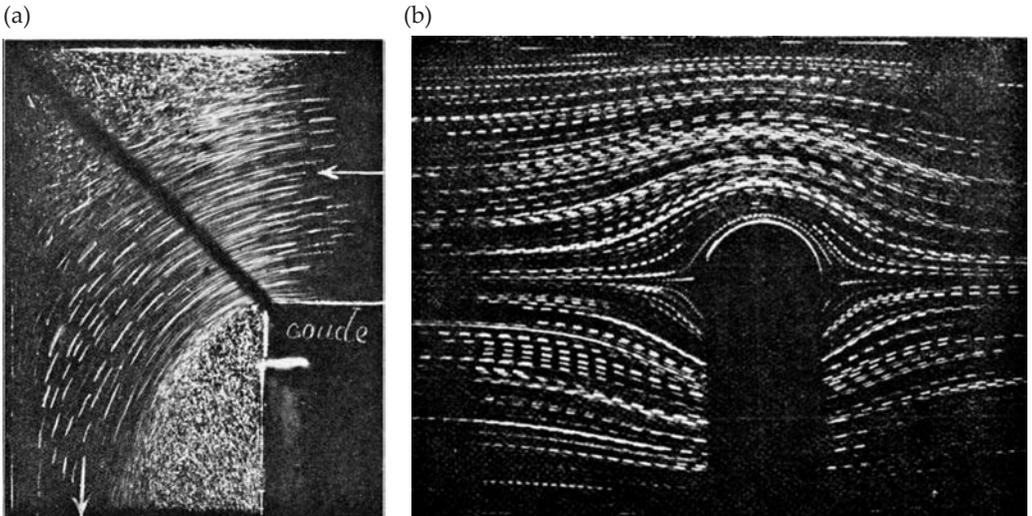


Figure 7.16 (a) Chronophotographie de l'écoulement dans le plan médian d'un coude de section carrée (4 cm 4 cm) (Camichel & Escande, 1925) ; (b) autour d'un cylindre à petit nombre de Reynolds (Camichel, 1929).

Le schéma du montage est représenté dans la Figure 7.15 ; en *A* se trouve un arc [électrique] : 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 le plan *xy* ; la photographie obtenue est agrandie suivant le cas dans le rapport de un à trois ou de un à cinq³³.

La Figure 7.16 montre les chronophotographies de l'écoulement dans un coude – visualisant le décollement à l'aval de l'arête – et de l'écoulement visqueux autour d'un cylindre, symétrique entre l'amont et l'aval.

³³ Camichel (1920*d*).

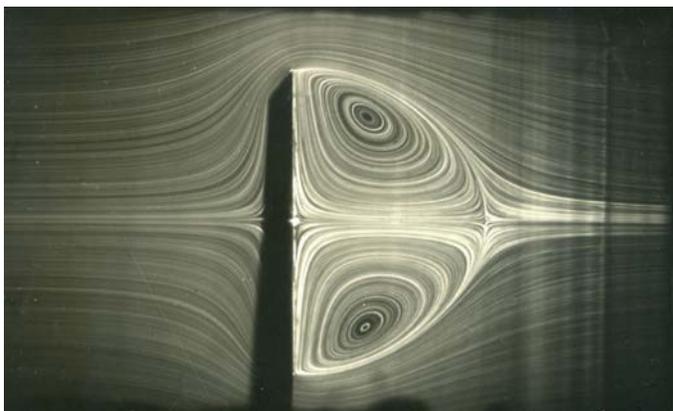


Figure 7.17 Visualisation de l'écoulement, de gauche à droite, autour d'un disque à petit nombre de Reynolds (Camichel & Dupin, 1931).

La Figure 7.17 montre les lignes de courant autour d'un disque à petit nombre de Reynolds, cliché ici obtenu avec un éclairage continu.

Dans une étude ultérieure de colloïdes (solutions aqueuses de gélatine), la méthode chronophotographique met en évidence le caractère particulier de l'écoulement de ces « fluides à seuil » : le profil des vitesses, entre deux plaques de verre proches l'une de l'autre, montre « une répartition très différente de celle de la parabole classique [...] ; la courbe obtenue comporte une partie plate, dont la théorie explique l'existence » (Figure 7.18)³⁴.

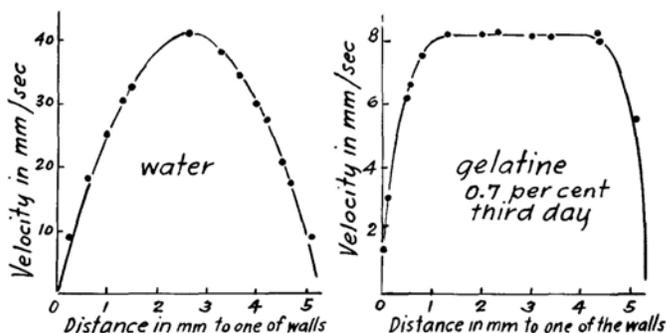


Figure 7.18 Profil de vitesse entre deux plaques parallèles, pour l'eau et pour une solution de gélatine à 0,007 % (Camichel & collab., 1932).

³⁴ Pichot & Dupin (1931) ; Camichel & collab. (1932).

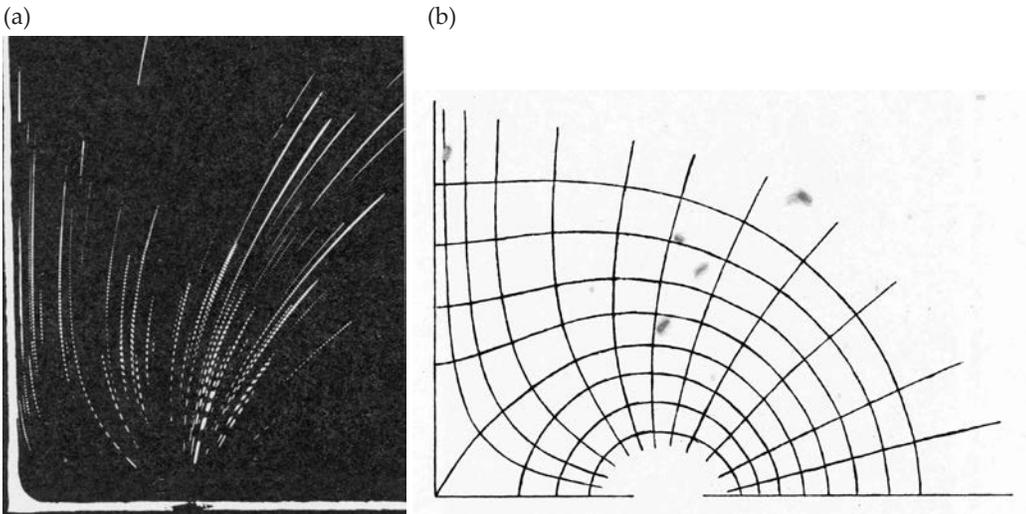
7.5.2. Mesure de la vorticité et de l'accélération

À partir du champ des vitesses, la chronophotographie permet de déterminer des grandeurs physiques telles que l'accélération et le vecteur tourbillon (moitié de la vorticité). Ce dernier est obtenu à partir des gradients de vitesse, ou par la détermination de la circulation de la vitesse le long d'un contour fermé et l'application du théorème de Stokes (méthode plus précise). Cette dernière méthode est appliquée par exemple au déversement sur les barrages à seuil épais, à l'appel d'un ajutage dans une chambre d'eau, et aux mouvements giratoires à axe vertical engendrés par l'écoulement par un orifice.

La chronophotographie est donc un outil d'analyse de la nature des écoulements, notamment de leur caractère potentiel ou rotationnel. Il est ainsi montré que dans les chambres d'eau, comme au-dessus des déversoirs, le mouvement est potentiel en dehors du voisinage des parois³⁵. La méthode permet également la vérification expérimentale de la construction d'un écoulement potentiel par la méthode des images de Kelvin³⁶. La Figure 7.19 en donne une illustration.

Figure 7.19

(a) Chronophotographie de l'écoulement dans une chambre d'eau percée à sa base d'un orifice à 3 cm de la paroi latérale. (b) Lignes de courant et isopotentielles de l'écoulement potentiel correspondant (Camichel, 1920*d*).



³⁵ Camichel (1920*b,c,d*) ; Escande (1929).

³⁶ Camichel (1920*a,d*).

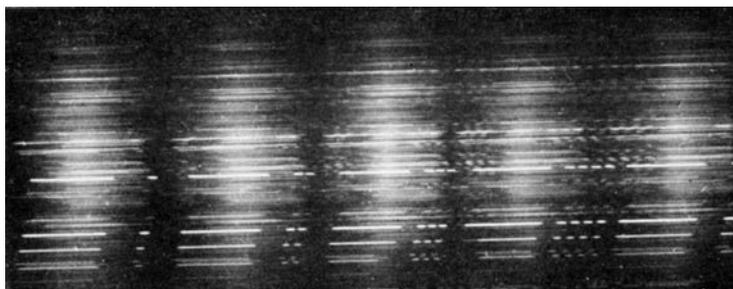
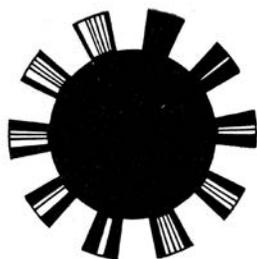


Figure 7.20 Chronophotographie pour l'étude des phénomènes transitoires : « disque Morse » et exemple de cliché obtenu (Baubiach, 1936).

7.5.3. Régimes transitoires

Dans le cas d'écoulements instationnaires (régimes transitoires, périodiques, ou turbulents), la méthode chronophotographique doit être adaptée afin de débrouiller les trajectoires intriquées ou de lever l'indétermination du sens de parcours. On emploie alors, 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 filet³⁷.

La Figure 7.20 montre un tel « disque Morse » et un exemple de cliché obtenu. Le dispositif sera notamment utilisé pour l'étude d'écoulements oscillants et pour l'étude de la dynamique d'établissement du sillage d'une plaque³⁸.

7.5.4. Mesures par fil chaud et autres techniques

Lorsqu'un fil métallique fin, chauffé par un courant électrique (effet Joule), est immergé dans un écoulement, il

³⁷ Camichel (1929, p. 24).

³⁸ Crausse & Baubiach (1933) ; Crausse (1936) ; Baubiach (1936).

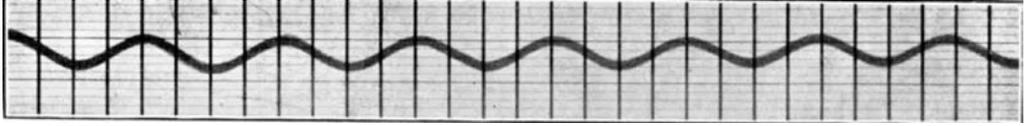


Figure 7.21 Enregistrement par fil chaud des tourbillons alternés de Bénard-Kármán produits à l'aval d'un obstacle cylindrique de 5 mm de diamètre, dans un écoulement de 4 cm/s. (Crausse & Baubiac, 1931a).

est refroidi par cet écoulement et sa résistance varie. L'anémométrie par fil chaud est fondée sur ce phénomène. Les premiers appareils sont mis au point en France au début des années 1920 par Antoine Magnan, Eugène Huguenard et André Planiol, qui les utilisent pour des mesures pionnières de turbulence atmosphérique³⁹. Ils apparaissent à peu près en même temps en Allemagne, en Angleterre et aux Pays-Bas. Un appareil fabriqué par Magnan, Huguenard et Planiol arrive au laboratoire d'hydraulique de Toulouse vers 1928, où il est mis en œuvre dans la thèse de Dupin (1930). La méthode est ensuite reprise par Crausse et Baubiac pour l'étude de phénomènes oscillants et de tourbillons de sillage, résolvant des périodes de l'ordre du centième de seconde (Figure 7.21)⁴⁰. La méthode ne semble pas avoir été utilisée, cependant, pour la mesure quantitative de vitesses, laquelle pose une délicate question d'étalonnage (non linéaire).

D'autres techniques de mesure sont développées au laboratoire d'hydraulique : visualisation par précipité chimique, mesure de forces par l'enregistrement de petits déplacements des armatures d'un condensateur, tubes de Pitot pour la mesure de très petites différences de pression. Cette dernière technique est notamment utilisée pour la mesure de la distribution de pression autour de barreaux cylindriques ; des coefficients de résistance et leur variation avec le nombre de Reynolds en sont déduits, lesquels « concordent avec les déterminations faites au Laboratoire de Göttingen sur l'air⁴¹. »

³⁹ Charru (2021, chap. 3).

⁴⁰ Crausse & Baubiac (1931a, 1933) ; Crausse (1936) ; Baubiac (1936).

⁴¹ Camichel & collab. (1932).

7.6. Tourbillons alternés de Bénard-Kármán

Les tourbillons, notamment ceux qui prennent naissance dans le sillage d'obstacles, donnent lieu à d'importantes recherches expérimentales entre 1925 et 1936. La thèse de Pierre Dupin 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 Crausse (vibrations de fils tendus, tourbillons secondaires)⁴².

7.6.1. Sillage proche et surfaces de discontinuité

Dès que sa vitesse n'est plus très faible, l'écoulement autour d'un obstacle fait apparaître à son aval une région particulière – un sillage – à l'intérieur duquel le fluide est animé d'un mouvement très différent de celui qui règne dans le reste de l'écoulement. Une frontière bien définie, en général mouvante, délimite les deux régions. Cette frontière, siège de forts cisaillements, dessine des tourbillons entraînés vers l'aval.

Pour le rendre accessible au calcul, un tel sillage peut être schématisé, dans une première approche, par un fluide au repos par rapport à l'obstacle, contourné par un écoulement extérieur potentiel. Le problème théorique consiste alors à déterminer la *forme* de la frontière du sillage, ou « surface de discontinuité », qui autorise une telle schématisation du point de vue mécanique. Un enjeu important du calcul est la détermination de la résistance de traînée de l'obstacle⁴³. Marcel Brillouin – qui a dirigé la thèse de Camichel –, dans un article publié en 1911 prolongeant les travaux théoriques de Schwarz, Christoffel et Levi-Civita, pose ainsi le problème :

La résistance qu'un fluide très peu visqueux, très peu compressible, oppose au mouvement de translation permanent rapide d'un solide a été rattachée

⁴² Cf. Annexe A pour les références des thèses.

⁴³ Darrigol (2005, § 7.1.2).

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'Helmholtz⁴⁴.

Les « objections diverses » que mentionne Brillouin portent sur la croissance non bornée, vers l'aval, de la largeur de la « poupe liquide » (dont la masse est donc *infinie*), sur l'instabilité des surfaces de discontinuité sur lesquelles croissent des tourbillons, et sur le désaccord entre prédictions et mesures de la résistance de traînée. La théorie de la couche limite de Prandtl, qui naît en 1904, ouvre une voie bien plus prometteuse à une meilleure appréhension du problème, mais cette théorie ne sera connue en France (comme en Angleterre) qu'au début des années 1920⁴⁵.

En dépit des objections que soulève leur théorie, les surfaces de discontinuité ont cependant une certaine réalité, au moins dans certaines situations, qui justifient leur investigation expérimentale. C'est dans ce contexte que Camichel entreprend vers 1920 une série de travaux sur ces surfaces, visant à déterminer leur forme, leur stabilité, la position du point de l'obstacle où elles prennent naissance, pour divers écoulements autour d'obstacles ou au travers d'ajutages⁴⁶. Une illustration en est donnée sur la Figure 7.22, qui montre, à l'aval d'une palette inclinée, une frontière nette entre un écoulement extérieur régulier (laminaire) et un sillage agité (turbulent). La forme de la frontière peut, pour certains obstacles, être comparée à celle résultant du calcul. Ainsi, pour une plaque carrée de 3 cm de côté placée normalement à l'écoulement,

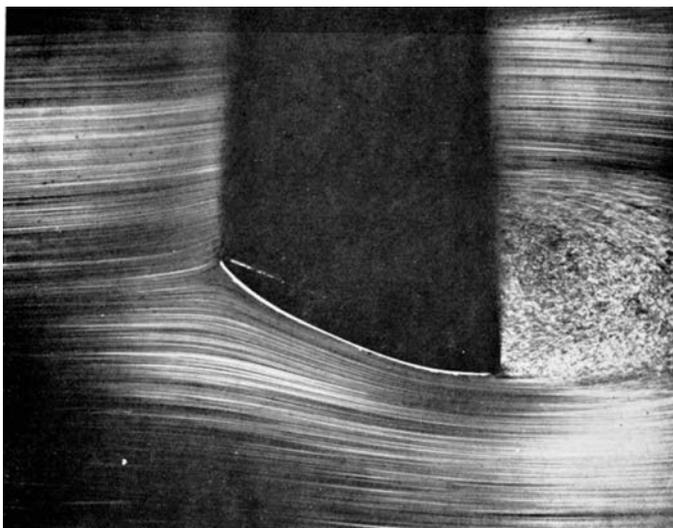
[...] la concordance des premiers éléments de la surface de discontinuité observée et calculée est remarquable sur une longueur de 1 cm environ. Au-delà, les

⁴⁴ Brillouin (1911).

⁴⁵ Charru (2021, chap. 3).

⁴⁶ Camichel (1922) ; Camichel & Ricaud (1924) ; Camichel *et al.* (1925).

Figure 7.22 Écoulement (de gauche à droite) autour d'une palette inclinée : une « surface de discontinuité », séparant l'écoulement laminaire extérieur du sillage turbulent, est bien identifiable (la partie sombre au-dessus de la palette est une ombre) (Camichel *et al.*, 1925).



tourbillons mélangent les deux zones et la surface de discontinuité perd sa netteté ; mais, on peut voir que la surface observée se détache de la surface calculée et se place à l'intérieur de celle-ci⁴⁷.

La théorie n'est donc vérifiée qu'au voisinage de l'obstacle. Elle tombe également en défaut aux faibles vitesses où dominent les tourbillons de Bénard-Kármán. Ainsi pour l'écoulement autour d'un disque :

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, Joukovski, etc.⁴⁸.

Ces observations marquent bien les limitations du concept de surface de discontinuité.

⁴⁷ Camichel (1922).

⁴⁸ Camichel *et al.* (1925).

7.6.2. Brève histoire des tourbillons de sillage

L'intérêt pour les tourbillons de sillage remonte, historiquement, à la question du son émis par une corde tendue dans un courant d'air et aux harpes éoliennes qui tirent parti musicalement du phénomène. Le physicien tchécoslovaque Vincenc Strouhal a établi en 1878 que la fréquence f 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, $f = 0,185 V/D$. Lord Rayleigh, en 1896, met ce son en relation avec l'instabilité d'une « surface de discontinuité » de Helmholtz dans le sillage de la corde. De plus, pour rendre compte du fait que, selon Strouhal, la hauteur du son dépend de la température, il propose une correction de la loi de Strouhal faisant intervenir la viscosité ν :

$$\frac{fD}{V} = 0,195 \left(1 - 20,1 \frac{\nu}{VD} \right). \quad (7.2)$$

Henri Bénard, à Lyon, entreprend à partir de 1904 de minutieuses études des tourbillons engendrés dans le sillage de divers obstacles déplacés dans une couche liquide au repos⁴⁹. Bénard identifie les tourbillons par la légère dépression qu'ils impriment à la surface libre. Kármán, à Göttingen, pose du 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 Kármán laissent toutefois plusieurs points dans l'obscurité. Le premier est que la théorie de Kármán, qui fait l'hypothèse d'une géométrie très simplifiée et d'un nombre de Strouhal constant, n'est pas bien vérifiée expérimentalement. Un second point est que les fréquences mesurées par Bénard (et aussi par E. G. Richardson en Angleterre) 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.

⁴⁹ Wesfreid (2006).

7.6.3. Sillage stationnaire et apparition des tourbillons alternés

Installation expérimentale. Le montage de Dupin et Teissié-Solier est essentiellement constitué d'un ajutage, de 30 cm de diamètre, alimenté à partir d'un bassin par l'intermédiaire d'une tubulure convergente (Figure 7.23). Cette tubulure crée dans l'ajutage un écoulement laminaire de vitesse uniforme (sauf au voisinage immédiat des parois) dans lequel est plongé l'obstacle à étudier – en général une tige de section circulaire de diamètre D . Le montage optique pour la chronophotographie est semblable à celui représenté sur la Figure 7.15. Les conditions expérimentales sont soigneusement contrôlées ; la température, dont dépend la viscosité, est mesurée avec une précision meilleure que le dixième de degré.

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 encore par la « méthode des franges » :

Les particules d'aluminium utilisées pour l'observation 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.

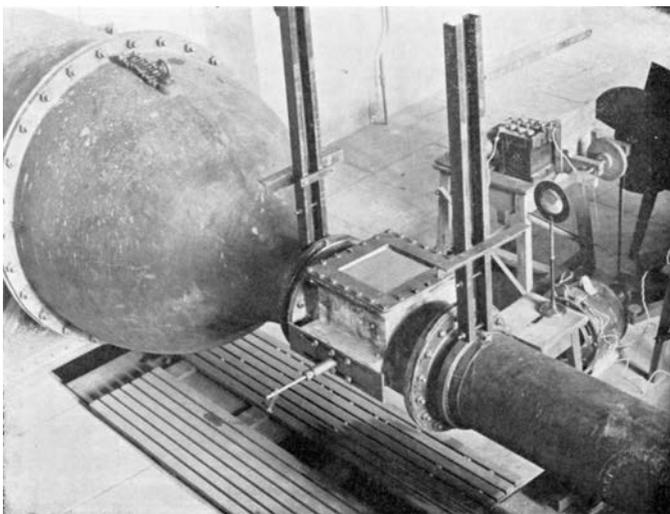


Figure 7.23 Installation expérimentale de Dupin et Teissié-Solier ; de gauche à droite : tubulure convergente, cellule de visualisation, conduite de 30 cm de diamètre ; à l'arrière : montage optique (Dupin, 1930).

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 stroboscopie⁵⁰.

La mesure par fil chaud intervient, comme indiqué plus haut, à partir de 1928.

Observations. À faible vitesse (petit nombre de Reynolds), l'écoulement contourne l'obstacle en lui restant attaché, sans décollement. À vitesse plus grande, un sillage apparaît à l'aval, constitué de deux recirculations centrées sur deux points α et s'étendant jusqu'à un point β de vitesse nulle (Figure 7.24a). Au-delà d'une certaine vitesse critique, le sillage se met à osciller transversalement. L'apparition de ce « régime turbulent » est ainsi décrite par Dupin :

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 Figure 7.24b, 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.

Emportés par le fluide, ces tourbillons s'éloignent en entraînant avec eux une partie du précipité (photos 29 et 30 de la Figure 7.24b). 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

⁵⁰ Camichel (1927).

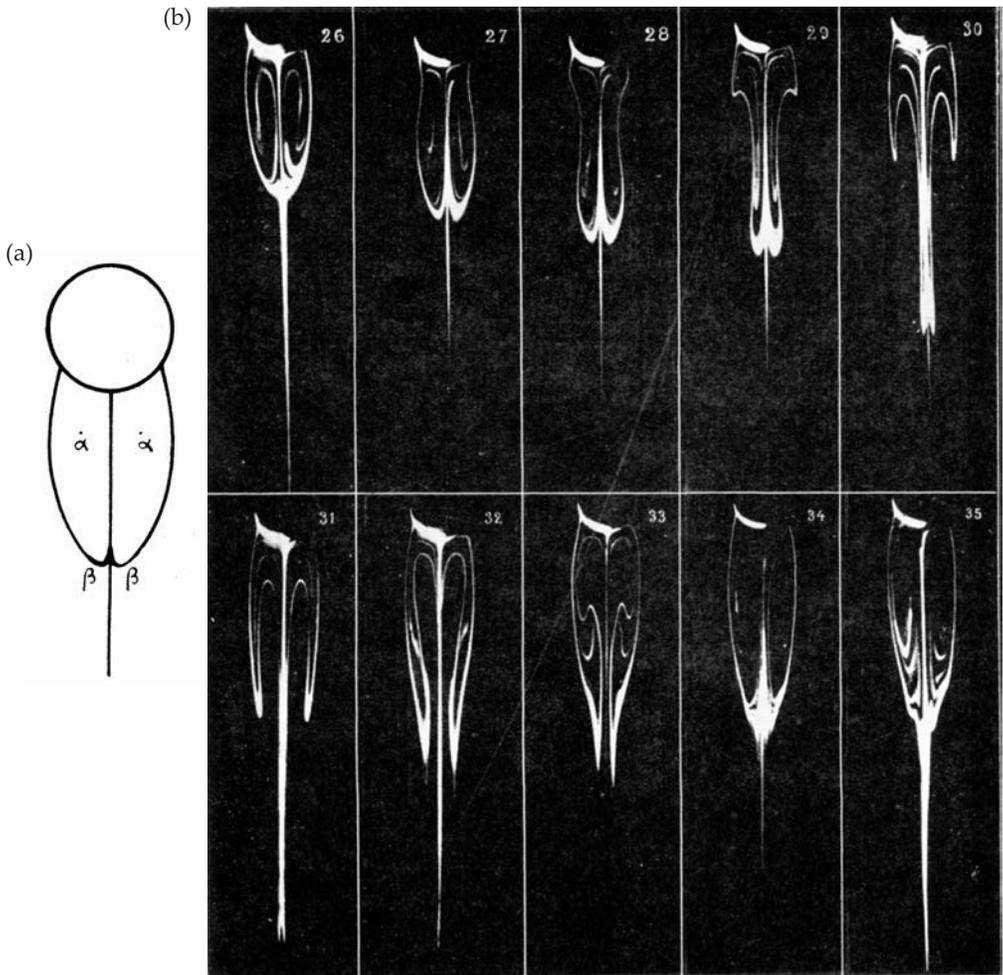


Figure 7.24 (a) Schéma du sillage stationnaire avec ses points singuliers α et β de vitesse nulle ; (b) photographies, extraites d'un film, montrant l'évolution du sillage pendant le transitoire de naissance du « régime turbulent » (Camichel *et al.*, 1927).

face (photos 34 et 35). Bientôt ces encoches, à peine visibles au début, s'accusent nettement (Figure 7.25, photos 36 et 37). 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 terminée⁵¹.

⁵¹ Dupin (1930, p. 42).

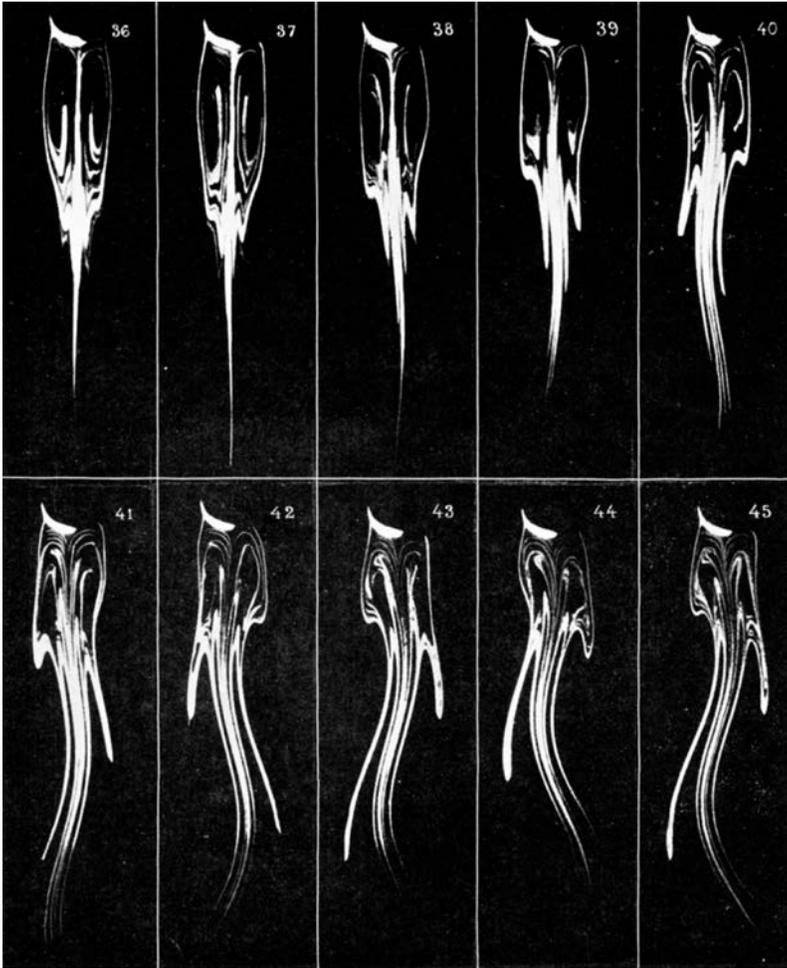


Figure 7.25 Suite de la Figure 7.24 (Camichel *et al.*, 1927).

7.6.4. Relations de similitude

Variant la viscosité du fluide et le diamètre de l'obstacle, il est montré que la longueur du sillage (définie par le point β sur la Figure 7.24a) vérifie les lois de la similitude de Reynolds. Il est de même pour la fréquence des oscillations. La similitude requiert cependant que la longueur L de la tige soit suffisamment grande devant le diamètre ($L/D > 25$)⁵².

⁵² Dupin & Teissié-Solier (1928, p. 24-25 & 35-38).

La relation Strouhal-Reynolds. Si la loi de similitude dynamique s'applique, précise Dupin,

[...] le nombre $S = D/V T$, 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 Figure 7.26, 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 20 000, [où] le paramètre de Strouhal S conserve une valeur sensiblement constante et voisine de 0,200. [...] La théorie de Kármán [qui présuppose un paramètre de Strouhal constant] se trouve donc être en défaut pour la première portion de la courbe de Strouhal⁵³.

La « courbe de Strouhal » reportée sur la Figure 7.26, tout à fait originale et remarquable, est publiée dès 1927⁵⁴. Le nombre de Reynolds critique Re_c marquant l'apparition spontanée des tourbillons alternés est trouvé égal à 48, résultat confirmé depuis et devenu classique.

Dans d'autres expériences, le cylindre est placé à l'extrémité aval de la 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, indiquent Dupin et Teissié-Solier, sont beaucoup moins précises qu'en régime non turbulent, mais tous les

⁵³ Dupin (1930, p. 29).

⁵⁴ Camichel (1927) ; Dupin & Teissié-Solier (1928) ; Camichel *et al.* (1928).

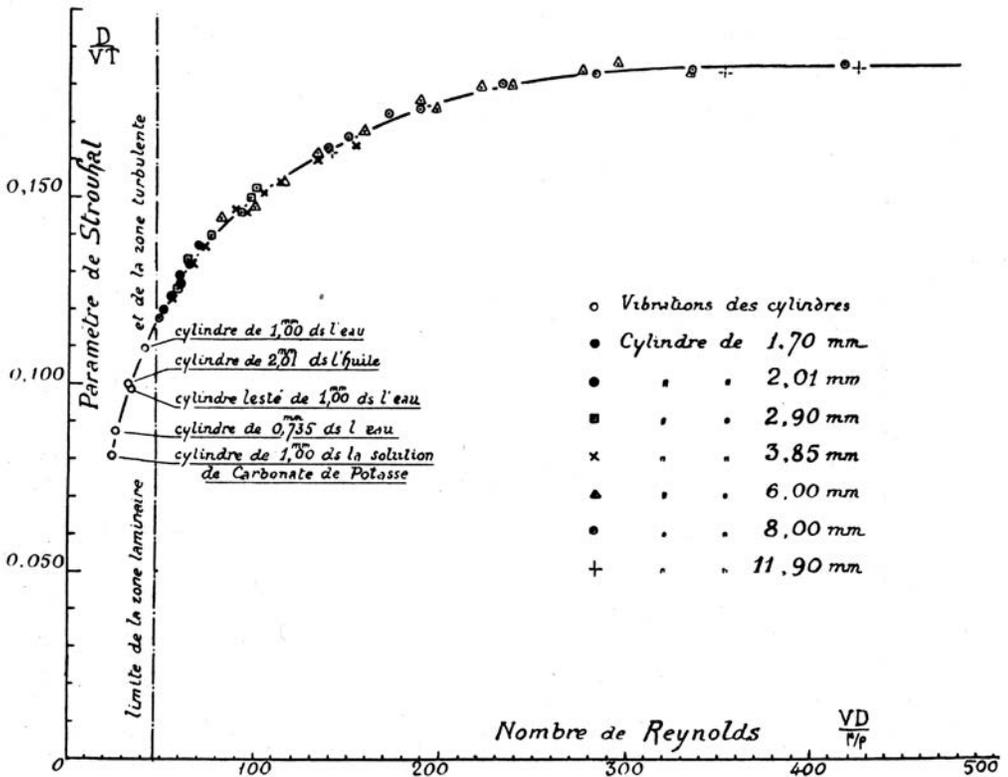


Figure 7.26 Période des tourbillons de Bénard-Kármán : nombre de Strouhal fonction du nombre de Reynolds ; au-dessous du seuil $Re_c \approx 48$, les tourbillons, provoqués par une perturbation de l'écoulement, sont transitoires (Camichel *et al.*, 1927).

points se disposent bien autour d'une courbe moyenne qui est celle du régime non turbulent⁵⁵. »

Prolongement de la courbe en dessous du seuil. De remarquables observations portent sur des phénomènes se produisant, avec les tiges de petit diamètre, *en-dessous* du seuil d'apparition spontanée des tourbillons alternés ($Re_c = 48$). Le premier de ces phénomènes est l'apparition, pour une certaine vitesse du fluide, d'une vibration de la tige dans un plan perpendiculaire à la direction générale de l'écoulement. La fréquence de cette vibration, reportée sur la Figure 7.26, s'inscrit de façon remarquable sur

⁵⁵ Dupin & Teissié-Solier (1930) ; Dupin (1930, p. 72-74).

la courbe de Strouhal extrapolée sous le seuil. Comme le notent les auteurs de l'étude, « 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. » Cette hypothèse se trouve confirmée. Dupin, dans sa thèse, précise la description de la résonance :

[Augmentant la vitesse de l'écoulement par petits incréments,] 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. [...]

Nous avons renouvelé l'expérience avec diverses tiges et des liquides de viscosités bien supérieures à celle de l'eau⁵⁶.

Teissié-Solier reprend l'étude en perturbant le sillage de diverses manières : par un choc sur l'obstacle, par la rencontre du sillage avec un tourbillon provoqué latéralement, ou par 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 (Figure 7.27). Le sillage présente alors durant quelques secondes 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 perturbation⁵⁷.

Pour rendre le phénomène permanent, poursuivent Camichel et Teissié-Solier, il suffit de disposer sur la paroi de la conduite, à hauteur de l'obstacle, un robinet tournant analogue à celui utilisé par l'un de nous

⁵⁶ Dupin (1930, p. 69-70) ; sur E. G. Richardson, cf. Hager (2009, p. 1625).

⁵⁷ Camichel & Teissié-Solier (1935, p. 706).

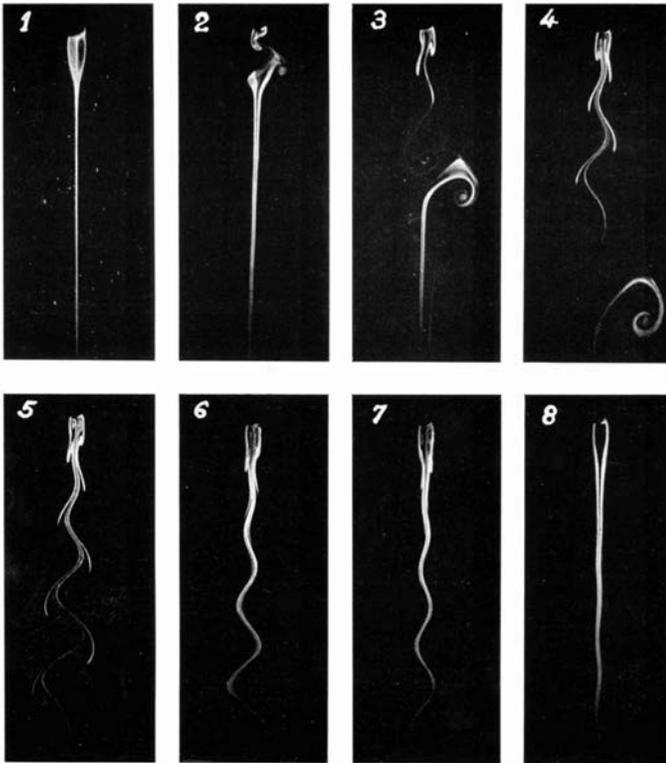


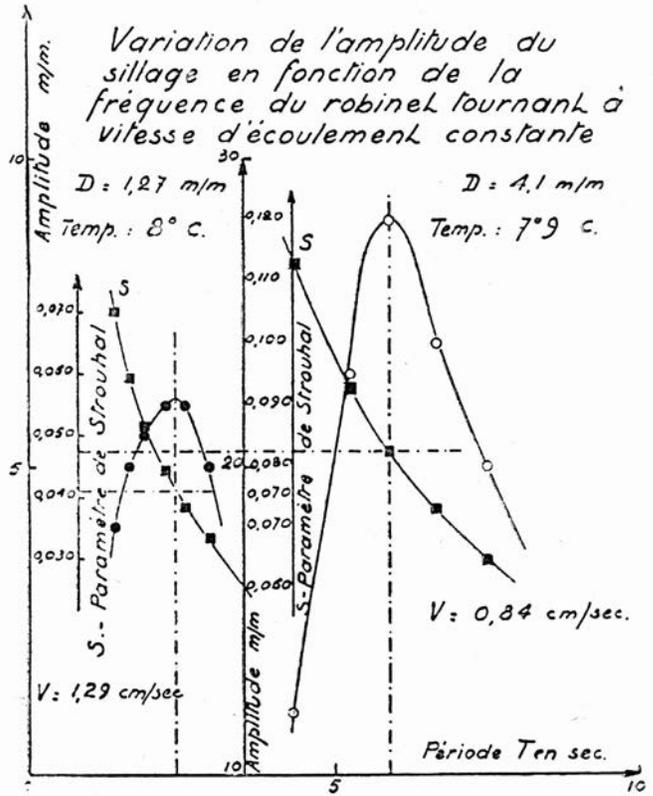
Figure 7.27 Naissance d'une allée de tourbillons consécutive à un choc sur le cylindre (photos 1 à 4) et disparition de cette allée quelques instants plus tard (photos 5 à 8), pour un nombre de Reynolds $Re = 44$ inférieur au seuil $Re_c = 48$ (Camichel & Teissié-Solier, 1935).

avec MM. Eydoux et Gariel dans des recherches sur les coups de bélier. 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.

La Figure 7.28 montre, plus précisément, l'amplitude des oscillations du sillage selon la période de la perturbation de débit imposée par le robinet tournant, pour deux nombres de Reynolds en deçà du seuil $Re_c = 48$; la résonance survient lorsque la période du forçage coïncide avec celle des tourbillons alternés libres (transitoires) produits par une perturbation impulsionnelle.

Écoulement à surface libre. Les résultats précédents, obtenus dans un écoulement en charge, sont complétés par Teissié-Solier par des expériences dans une cuve à

Figure 7.28 Amplitude des oscillations du sillage selon la période de la perturbation de débit imposée par un robinet tournant, pour $Re = 11,9$ et $24,4$ (en deçà du seuil $Re_c = 48$) ; une résonance survient lorsque la période du forçage coïncide avec celle des tourbillons alternés libres (Camichel, 1935a).



surface libre, où l'obstacle est tracté à vitesse constante⁵⁸. Il apparaît alors que pour un cylindre de section circulaire, la fréquence des tourbillons s'aligne sur la même courbe de Strouhal que celle des écoulements en charge. Des obstacles de section variée (carrée, rectangulaire, triangulaire, ou en lame de couteau) sont aussi étudiés, pour des nombres de Reynolds jusqu'à 23 000. Au-delà de $Re \approx 1\,000$, 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. Ces résultats permettent d'interpréter l'observation de Bénard que ses propres résultats ne vérifiaient pas la similitude : ils ne correspondaient pas à des obstacles géométriquement semblables, ou leur rapport L/D était insuffisant.

⁵⁸ Teissié-Solier (1931) ; Dupin & Teissié-Solier (1931).

7.6.5. Durée d'établissement du « régime turbulent »

L'établissement des tourbillons alternés, au-dessus du seuil, n'est pas instantané : l'amplitude des oscillations croît exponentiellement dans les premiers instants, comme le montre la Figure 7.29, puis tend vers une valeur constante. Camichel note que l'allure de ces variations correspond à celle que prédit l'équation de Van der Pol, équation établie en 1927 pour décrire « des oscillations sinusoïdales et de relaxation [électriques] et s'appliquant d'ailleurs aux développements de nombreux phénomènes naturels. » L'annulation du décrement logarithmique permet une détermination précise du seuil Re_c^{59} .

Baubiac, dans sa thèse, entreprend une étude systématique de ces temps d'établissement. Le mode opératoire consiste à imposer, à partir d'une vitesse un peu inférieure au seuil, des incréments brusques de vitesse, et à mesurer le temps de relaxation vers le régime établi – où le sillage atteint son amplitude maximale. Comme le remarque Crausse, qui collabore avec Baubiac, ce temps est, à

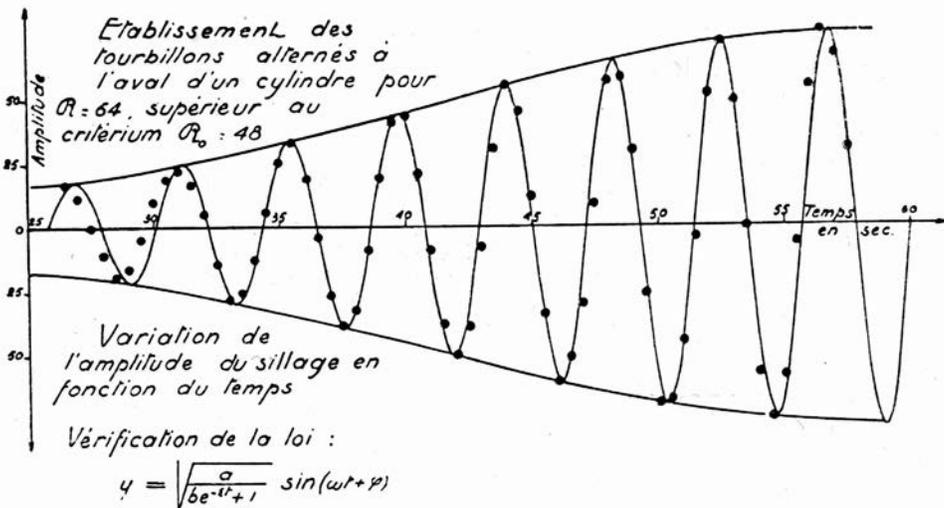


Figure 7.29 Établissement des tourbillons alternés au-dessus du critérium (Camichel, 1935a).

⁵⁹ Teissié-Solier & Castagnetto (1938) ; sur l'histoire de l'équation de Van der Pol, cf. Ginoux (2017, p. 62-65).

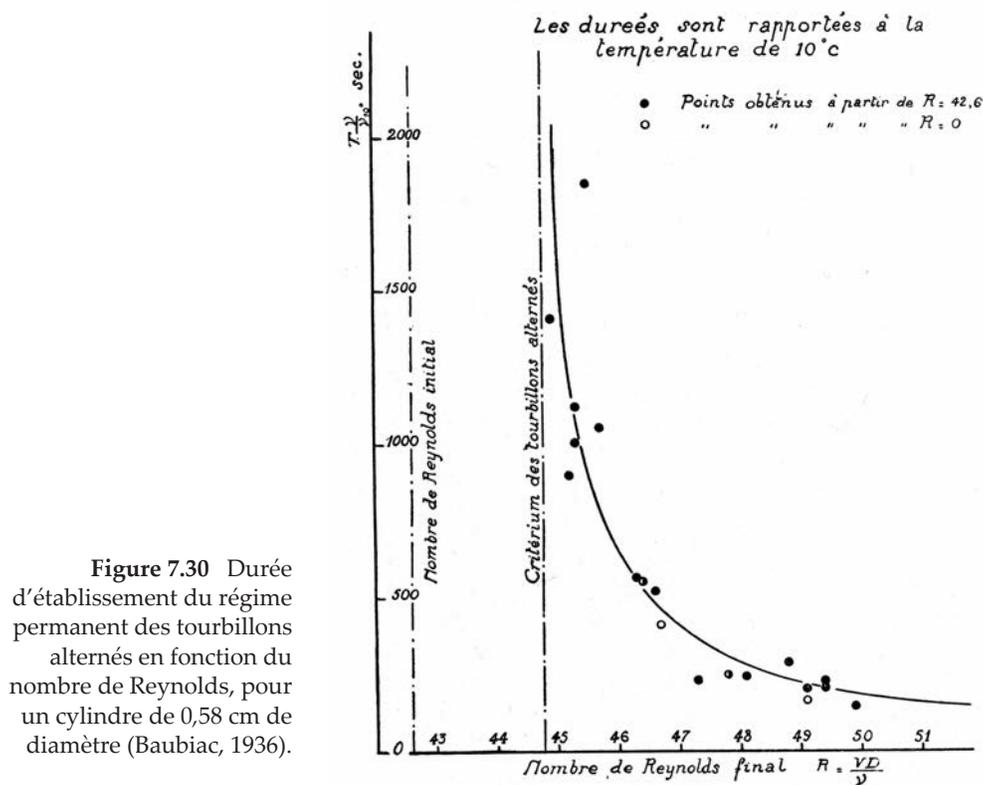


Figure 7.30 Durée d'établissement du régime permanent des tourbillons alternés en fonction du nombre de Reynolds, pour un cylindre de 0,58 cm de diamètre (Baubiac, 1936).

strictement parler, *infini*⁶⁰. Un temps *fini* de relaxation peut néanmoins être défini de plusieurs façons, par exemple comme la durée pour atteindre une fraction définie (95 %) de l'amplitude maximale des oscillations. Les résultats, présentés sur la Figure 7.30, sont ainsi commentés :

[Le temps de relaxation] 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 alternés⁶¹.

⁶⁰ Crausse (1936, p. 20-21).

⁶¹ Baubiac (1936, p. 39).

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*.

D'autres expériences montrent que lorsque le seuil est traversé en faisant *décroître* la vitesse,

[l'extinction des tourbillons] est représentée par une portion de courbe sensiblement symétrique de celle déjà tracée sur cette figure, par rapport à 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*.

Ce type de considérations liant le seuil d'une instabilité à la divergence d'un temps de relaxation, aujourd'hui classique, est dans les années 1930 tout à fait original et novateur.

7.6.6. Vibrations de tiges encastrées et de fils tendus

Tiges encastrées. Au cours de leur étude des tourbillons de sillage, Dupin et Teissié-Solier ont remarqué « 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 du corps, ce dernier se met à osciller *dans un plan perpendiculaire à la direction de cette vitesse*. » Des observations semblables ont été faites antérieurement par Rayleigh, Riabouchinsky et Richardson.

Cette étude, note Camichel, 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 Manche⁶².

⁶² Dupin (1930, p. 49) ; Camichel (1931, p. 21).

Les résultats ici reproduits portent sur des cylindres de section circulaire, de trois diamètres différents, semi-encastés dans une conduite de 30 cm de diamètre (encastés à leur base et libres à leur extrémité supérieure)⁶³. 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, indique Dupin, a une allure identique pour les trois cylindres (Figure 7.31). Pour une vitesse V_0 , fonction du diamètre du cylindre, l'obstacle commence à osciller ; l'amplitude est très faible [...] et la période Θ_0 égale à celle de ses oscillations libres lorsqu'on l'excite par un choc, tandis qu'il est plongé dans une cuve pleine d'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 vibrerait pas, $T = D/0,2 V$.

[Au-delà d'une vitesse V_1], le phénomène change d'aspect. [Les vibrations de la tige présentent] 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, [peu affectée par les vibrations de la tige].

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 Θ_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 Θ_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, 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. On a atteint la zone d'instabilité du fil.

⁶³ Dupin, 1930 ; Dupin (1930) ; Dupin & Teissié-Solier (1930).

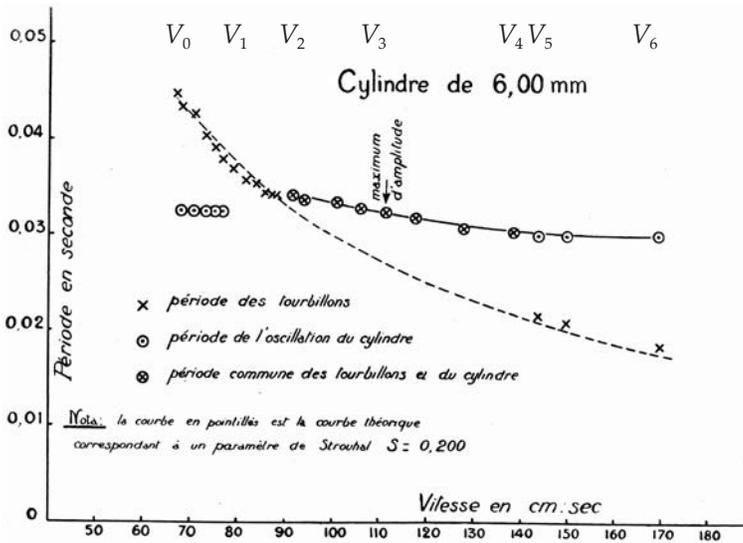


Figure 7.31 Périodes des tourbillons de sillage et des oscillations d'une tige cylindrique de 6 mm, à vitesse d'écoulement croissante (Dupin, 1930).

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 $T = D/0,2 V$. Enfin, pour une vitesse V_6 , la tige cesse d'osciller⁶⁴.

À vitesse décroissante, la même séquence de phénomènes est observée en sens inverse, mais avec des seuils un peu différents : le système présente une hystérésis.

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. 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 apparaissent⁶⁵.

⁶⁴ Dupin (1930, p. 51-52).

⁶⁵ Dupin (1930) ; Dupin (1930) ; Dupin & Crausse (1931) ; Crausse (1936).

Fils tendus. L'étude des vibrations de tiges semi-encastées est prolongée par Crausse au cas de fils tendus. La question intéresse, entre autres, les lignes électriques aériennes et leurs oscillations induites par le vent. Il s'agit, indique Crausse,

... 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 harmoniques⁶⁶.

La vitesse du fluide croissant par paliers, la vibration du fil dans une direction transverse à l'écoulement apparaît pour une vitesse V_1 et persiste jusqu'à une vitesse V_2 (Figure 7.32). Les vibrations du fil donnent à son enveloppe l'aspect d'un fuseau présentant un ventre à mi-hauteur. Fil et sillage ont même période : « fil et sillage sont, en quelque sorte, accrochés. » Cette période commune décroît au fur et à mesure que croît la vitesse, tout en restant supérieure à celle qu'auraient les tourbillons pour un fil rigide. L'amplitude de la vibration, de l'ordre du millimètre, passe par un maximum lorsque la période croise la période propre T_0 de vibration du fil. « Dès que la

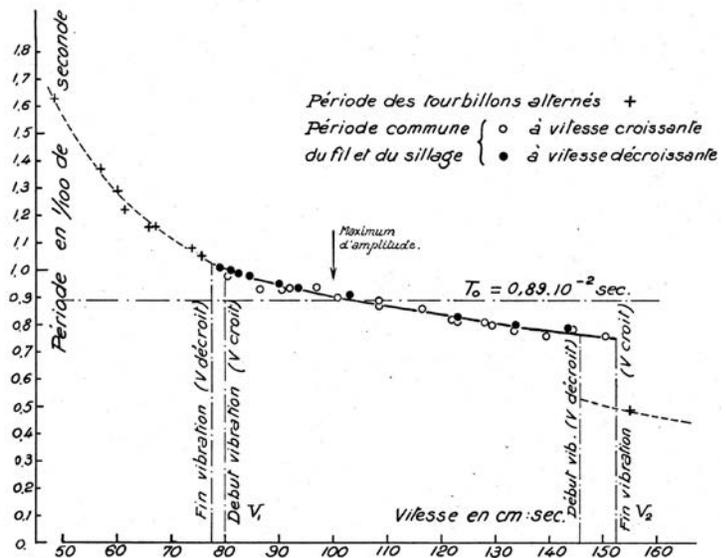


Figure 7.32 Vibration en fondamental d'un fil tendu dans l'eau en mouvement ; $D = 0,15$ cm, eau à 9°C , période propre du fil : $T_0 = 8,9$ ms (Crausse, 1936).

⁶⁶ Crausse (1936, p. 59-60).

valeur V_2 est atteinte, la vibration du fil cessant, la période d'oscillation du sillage diminue brusquement. »

Enfin, à vitesse décroissante, la même séquence de phénomènes se déroule dans l'autre sens, avec des vitesses V_1 et V_2 légèrement inférieures : le système présente une hystérésis semblable à celle constatée pour les tiges vibrantes.

Avec des fils fins, on observe non seulement le mode fondamental mais également ses 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. »

7.7. Tourbillons « secondaires » des couches cisillées

7.7.1. Description du phénomène

Dans le fil des études décrites précédemment sur les surfaces de discontinuité d'Helmholtz et les tourbillons de Bénard-Kármán, Baubiac et Crausse entreprennent l'étude de « tourbillons secondaires » ainsi définis par Crausse :

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 concision⁶⁷.

Ces tourbillons, aujourd'hui connus sous le nom de « tourbillons de Kelvin-Helmholtz », apparaissent dans toute région de fluide fortement cisillé et jouent un rôle majeur en hydrodynamique – notamment dans les processus de mélange et de diffusion turbulente. On présente ici les résultats obtenus pour la configuration schématisée

⁶⁷ Crausse (1936, p. 69) ; Crausse & Baubiac (1931b).

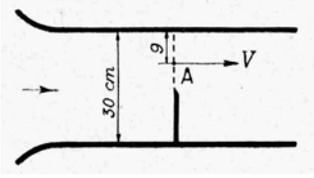


Figure 7.33 Configuration expérimentale pour l'étude des « tourbillons secondaires » engendrés sur l'arête A d'un obstacle (ici un demi-plan) placé dans un écoulement uniforme (Crausse, 1936).

sur la Figure 7.33, où l'obstacle est un demi-plan obturant une moitié de l'entrée d'une conduite, dans une région de vitesse uniforme. Le sillage est visualisé par un colorant émis juste à l'aval de l'obstacle.

Crausse 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 (Figure 7.34b). 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 (Figure 7.34c). Pour une vitesse encore plus grande, ces ondulations prennent la forme d'encoches dont l'allure se précise au fur et à mesure

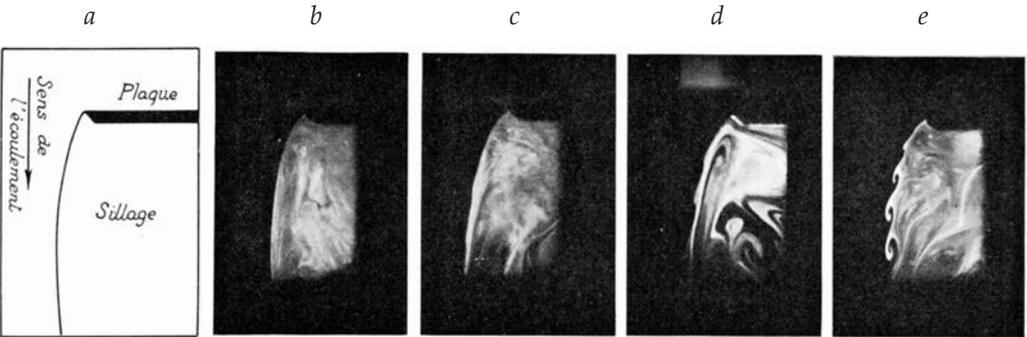


Figure 7.34 Schéma de la surface de discontinuité bordant le sillage d'une plaque, et séquence de photographies montrant le développement, sur cette surface, tourbillons secondaires (Crausse, 1936).

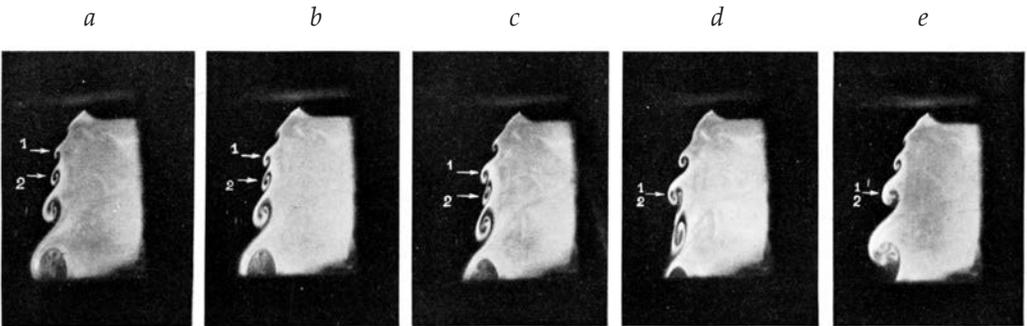


Figure 7.35 Appariement, à l'aval d'une plaque, de deux tourbillons secondaires par avalement de l'un par l'autre (Crausse, 1936).

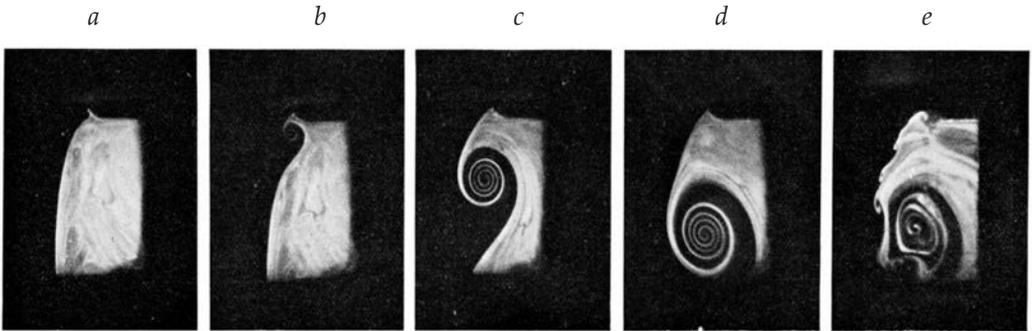


Figure 7.36 Stades successifs de la formation, à l'aval d'une plaque, d'un tourbillon transitoire et croissance sur celui-ci de tourbillons secondaires (Crausse, 1936).

qu'elles s'éloignent (Figure 7.34d). 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 (Figure 7.34e). [...]

Lorsque la vitesse est relativement grande, [certains tourbillons se résorbent peu après leur apparition], ou sont englobés par un tourbillon adjacent (Figure 7.35), de sorte que ceux qui subsistent sont moins nombreux et ont, par conséquent, une fréquence moyenne plus faible que celle des tourbillons initialement formés⁶⁸.

Cette observation de l'appariement des tourbillons, phénomène majeur de la dynamique tourbillonnaire, est alors tout à fait nouvelle. Les dimensions de ces tourbillons sont très réduites, de l'ordre du millimètre lorsqu'ils se trouvent à une distance centimétrique de l'obstacle. Des observations semblables sont faites pour des écoulements à surface libre, les tourbillons d'axe vertical se manifestant alors par de petites dépressions de la surface.

Interaction avec un tourbillon du régime transitoire.

Lors d'une augmentation brusque de la vitesse du fluide, un tourbillon transitoire apparaît au bord de l'obstacle, enfle et se transporte vers l'aval comme illustré par la Figure 7.36a-d. Les tourbillons secondaires apparaissent ensuite, superposés au tourbillon du régime transitoire (Figure 7.36e).

⁶⁸ Crausse (1936, p. 70-72).

7.7.2. Relations de similitude

À quel type de similitude correspondent les tourbillons secondaires ? À quelle loi d'échelle obéit, en particulier, leur période ? Cette période est mesurée de diverses façons : par fil chaud le plus fréquemment, ou par une méthode photographique ou stroboscopique. La Figure 7.37 montre la variation de cette période avec la vitesse du fluide, pour trois viscosités différentes. Les échelles sont choisies de façon à tester la similitude de Reynolds : la vitesse V est divisée par le rapport des viscosités, $k = \nu_{\text{fluide}}/\nu_{\text{eau}}$ et la période T est multipliée par ce même rapport. Le regroupement des points sur une même courbe, conclut Crausse, « montre que pour les vitesses envisagées, qui sont d'ailleurs *relativement faibles*,

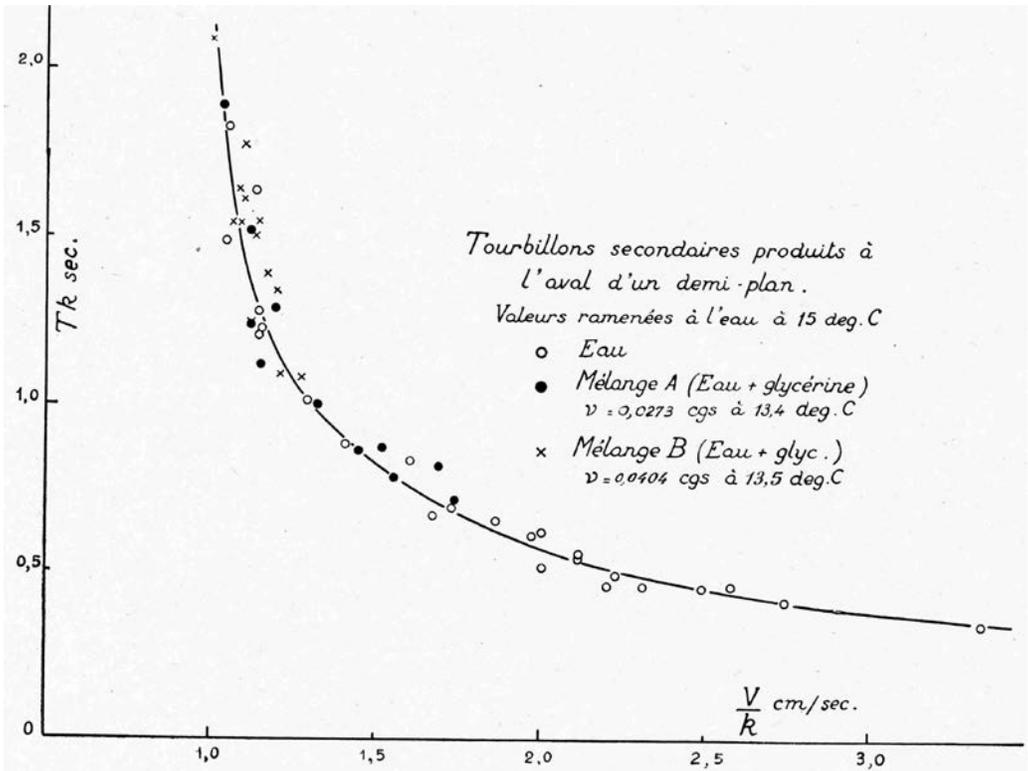


Figure 7.37 Tourbillons secondaires formés à l'aval d'un demi-plan : similitude de Reynolds des périodes pour des fluides de viscosités différentes. La courbe correspond à $Tk = 2,0(V/k)^{-2}$, soit $V(T/\nu)^{1/2} = Cte$ (Crausse, 1936).

la similitude de Reynolds s'applique au phénomène des tourbillons secondaires. » Les tourbillons étant de taille millimétrique, le diamètre de la conduite n'intervient pas ici⁶⁹.

Crausse note que la similitude est moins bien vérifiée aux plus grandes vitesses, où les périodes sont inférieures à 0,1 seconde : le désaccord est attribué à des appariements de tourbillons au voisinage immédiat de l'obstacle.

Des conclusions analogues sont obtenues pour les tourbillons à l'aval d'un cylindre, dont le diamètre intervient comme nouveau paramètre. Les points se regroupent alors sur une même courbe lorsqu'on porte Tk/λ^2 en fonction de $V\lambda/k$, où λ est le rapport des diamètres.

7.8. Régimes transitoires

Les régimes transitoires ou périodiques forment une part importante des travaux de thèse de Crausse et de Baubiach. Quatre situations y sont étudiées : (i) la mise en vitesse d'un liquide visqueux dans une conduite en charge, (ii) l'écoulement oscillant dans un tube, (iii) l'établissement d'un sillage autour d'un obstacle, et (iv) la résistance des corps immergés en mouvement non uniforme. Les questions de similitude en sont le fil conducteur. Crausse note en particulier, à ce propos :

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,

⁶⁹ L'instabilité de Kelvin-Helmholtz à l'origine des tourbillons est inertielle (non visqueuse), mais son taux de croissance $\sigma \propto V/\delta$ fait intervenir l'épaisseur δ de la couche cisailée, laquelle croît vers l'aval, par diffusion visqueuse, comme $\delta = (\nu x/V)^{1/2}$ où x est la distance à l'aval de l'arête A . La période de la longueur d'onde la plus amplifiée est $T \approx 8\delta/\sqrt{2}V$ (Rayleigh), soit $V^2T/\nu = 128 x/\lambda$. La courbe sur laquelle s'alignent les points de mesure correspondant à $V^2T/\nu \approx 200$ (avec $\nu_{\text{eau}} = 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{s}$), l'écoulement quasi-parallèle correspondant aux observations est situé à la distance $x \approx (200/128)\lambda \approx 1,6 \lambda$, conclusion très raisonnable qui conforte l'interprétation.

croyons-nous, d'étudier, pour ces raisons, la mise en vitesse dans chacun de ces deux cas⁷⁰.

On résume ici les résultats relatifs à la mise en vitesse de l'écoulement de Poiseuille dans une conduite, avec comme question associée la transition à la turbulence.

7.8.1. Mise en vitesse de l'écoulement de Poiseuille

Il s'agit de caractériser, pour l'écoulement dans un tube d'un fluide initialement au repos, l'évolution au cours du temps du profil radial des vitesses et la durée d'établissement du régime permanent. La question de la similitude 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 du fluide est mesurée par la méthode chronophotographique utilisant des disques d'obturation à fentes multiples (cf. Figure 7.20). Lorsque la vitesse est faible et l'accélération élevée, une variante de la méthode consiste à « étaler » l'image par un déplacement rapide du film photographique dans une direction normale à celle de l'écoulement⁷¹.

Similitude des profils de vitesse. Considérons deux écoulements de fluides de viscosités ν_1 et $\nu_2 = k \nu_1$ dans deux conduites de diamètres D_1 et $D_2 = \lambda D_1$. Dans une section éloignée de l'entrée, les conditions de similitude de Reynolds, déduites des équations du mouvement, imposent qu'en deux points homologues (*i.e.* à des distances d_1 et $d_2 = \lambda d_1$ de l'axe de la conduite), vitesses et temps homologues sont liés par les relations

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

⁷⁰ Crausse (1936, p. 5).

⁷¹ Crausse & Baubiac (1933).

Pour un même nombre de Reynolds, $V_1 D_1 / \nu_1 = V_2 D_2 / \nu_2$ où V_1 et V_2 sont les vitesses terminales, le profil radial de vitesse de l'écoulement 2, ramené à tout instant aux échelles de l'écoulement 1 par les relations ci-dessus, doit alors se superposer à celui de l'écoulement 1.

La Figure 7.38 montre, à différents instants, les profils de vitesse de deux écoulements d'eau dans des conduites de diamètre 2 cm et 5 cm, ramenés à un écoulement de référence d'eau à 15 °C dans une conduite de 5 cm. Les températures de l'eau dans les deux expériences n'étant pas tout à fait identiques, les viscosités sont différentes et donc $k \neq 1$. Ces profils, plats dans les premiers instants, se déforment à partir des parois et évoluent comme attendu vers le profil parabolique du régime de Poiseuille. Leur superposition montre que la similitude de Reynolds est bien vérifiée.

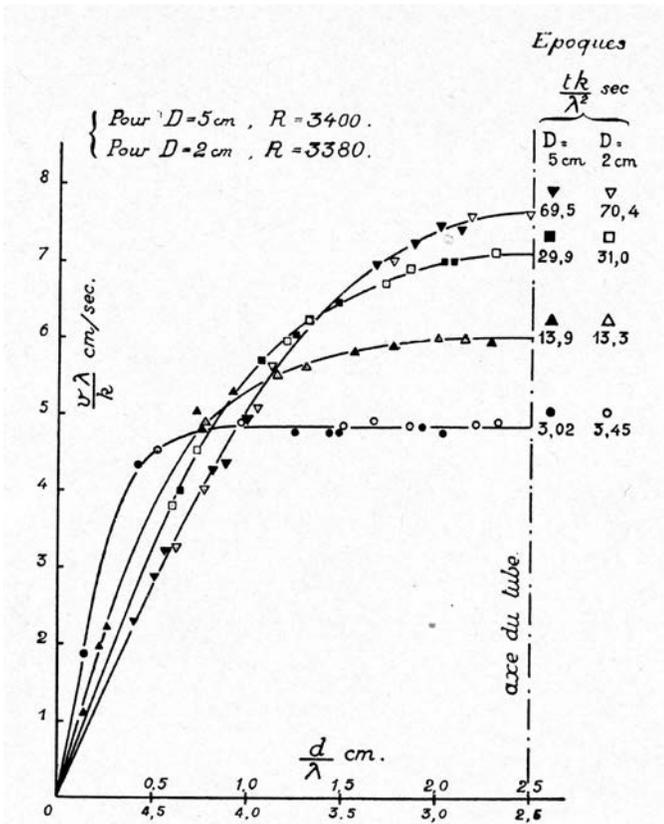


Figure 7.38 Transitoire d'établissement du profil radial des vitesses loin de l'entrée d'une conduite, pour deux écoulements d'eau ramenés aux échelles d'un écoulement d'eau à 15 °C dans une conduite de diamètre 5 cm ; à des temps homologues et pour un même nombre de Reynolds final, les profils se superposent (Crausse, 1936).

D'autres expériences, avec des fluides de viscosités très différentes, confirment l'analyse.

On observe en somme *dans le temps*, conclut Crausse, 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 tube⁷².

L'écoulement dans une section proche de l'entrée de la conduite est analysé de la même façon. L'écoulement y étant potentiel, la vitesse y est sensiblement uniforme. Les relations de similitude propres à ce régime sont présentées ci-dessous.

Similitude de la durée d'établissement de l'écoulement.

L'étude de la durée d'établissement du profil de vitesse pose tout d'abord la question de la définition de cette durée :

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 $1/n = 0,95$ ⁷³.

Deux sections sont considérées, au voisinage de l'entrée du tube et à grande distance de l'entrée. Les lois de similitude attendues y sont différentes, comme pour les profils de vitesse. On reproduit ici les résultats relatifs à l'entrée du tube, où l'on attend, du fait du caractère potentiel de l'écoulement, une similitude de fluides parfaits. Crausse argumente ainsi la loi $v(t)$ attendue :

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

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

⁷² Crausse (1936, p. 20).

⁷³ Crausse (1936, p. 21-23).

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 :

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

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 viscosité⁷⁴.

La Figure 7.39 montre, dans une section située à deux diamètres de l'entrée, l'évolution au cours du temps de la vitesse sur l'axe de la conduite. La superposition des courbes correspondant à deux diamètres et trois viscosités différentes, atteste que la similitude attendue est bien satisfaite. Des écarts apparaissent cependant, aux temps

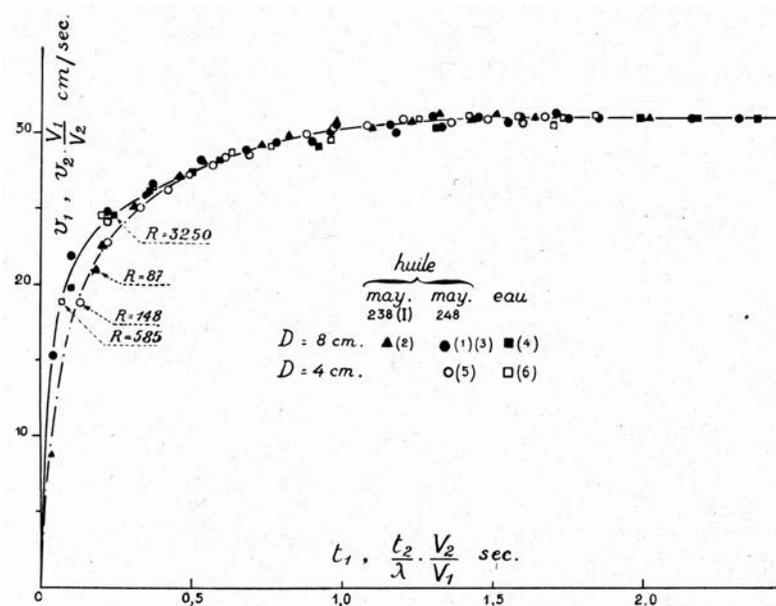


Figure 7.39
Relaxation vers sa valeur terminale de la vitesse sur l'axe à deux diamètres à l'aval de l'entrée, à partir de l'ouverture de la conduite, pour deux diamètres et trois viscosités différentes ; les viscosités extrêmes sont dans un rapport 450 (Crausse, 1936).

⁷⁴ Crausse (1936, p. 25-26).

courts, lorsque le nombre de Reynolds final est inférieur à 585. Ces écarts sont la manifestation du freinage visqueux dû aux parois qui, pour ces faibles nombres de Reynolds, intervient déjà à deux diamètres de l'entrée.

La durée d'établissement t_n en fonction de la vitesse terminale V est représentée sur la Figure 7.40. Les vitesses étant normalisées par k/λ et les durées par λ^2/k , les points se regroupent sur une hyperbole $V t_n/\lambda = Cte$ correspondant à la similitude attendue pour des fluides parfaits. La configuration de référence pour la définition de λ et k correspond à la conduite de diamètre $D = 8$ cm et à de l'eau à 15 °C. La multiplication par k sur les deux axes permet de paramétrer commodément l'axe des abscisses par le nombre de Reynolds terminal VD/ν .

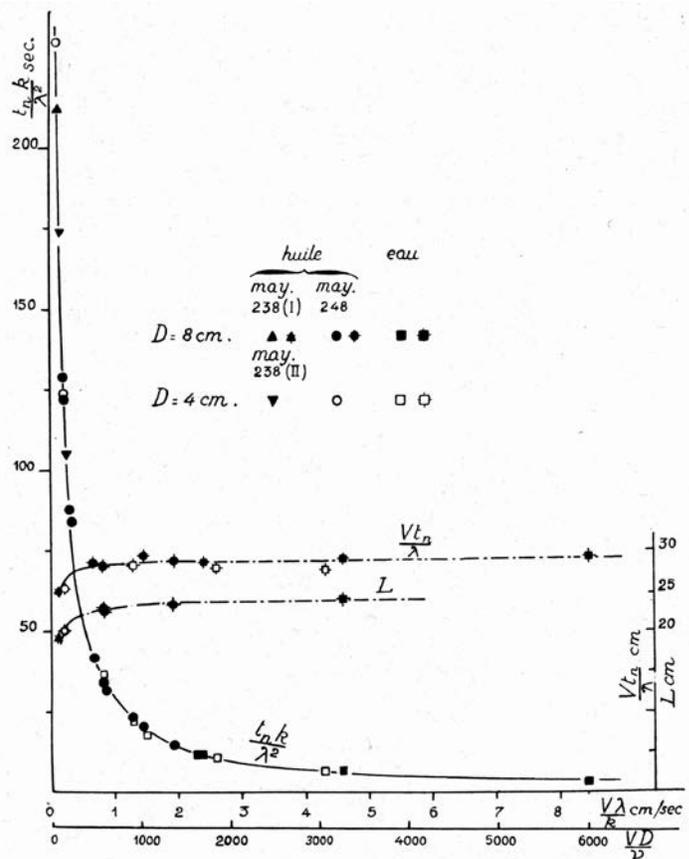


Figure 7.40 À deux diamètres de l'entrée de la conduite, durée $t_n k/\lambda^2$ du régime transitoire en fonction de la vitesse axiale atteinte $V \lambda/k$ et échelle de longueur intégrale $V t_n/\lambda$ (Crausse, 1936).

La figure donne également la longueur d'établissement $V t_n/\lambda$ ainsi qu'une grandeur L correspondant à une autre définition de cette longueur. Il apparaît que ces longueurs sont indépendantes du nombre de Reynolds terminal dès que celui-ci est supérieur à environ 500, résultat confirmant que la similitude des fluides parfaits n'est satisfaite qu'à cette condition.

7.8.2. Transition à la turbulence en conduite

Les fameuses expériences d'Osborne Reynolds, en 1883, sur la transition à la turbulence dans une conduite, ont engendré par la suite de nombreuses études, en particulier en Allemagne autour de Prandtl et de Kármán⁷⁵. Reprenant la question, Baubiac entreprend dans sa thèse une étude originale du temps d'établissement du régime turbulent⁷⁶. Des expériences préliminaires lui ont permis de déterminer, en régime permanent, le nombre de Reynolds critique Re_c correspondant à la transition à la turbulence. La vitesse intervenant dans la définition de ce nombre étant la vitesse sur l'axe, Re_c est trouvé égal à 3640.

La Figure 7.41 montre l'évolution de la vitesse sur l'axe du tube consécutive à une ouverture très rapide à l'aval, pour cinq expériences correspondant à deux diamètres de tube et à différentes hauteurs de charge à l'amont. La courbe inférieure correspond à un écoulement final laminaire, les quatre autres à un écoulement turbulent. Pour ces derniers, la vitesse croît dans un premier temps, comme attendu, puis, la turbulence survenant, chute brusquement vers sa valeur terminale. Baubiac précise ses observations en distinguant les deux cas d'un écoulement terminal très turbulent ($Re \gg Re_c$) et d'un écoulement marginal ($Re \gtrsim Re_c$) :

- a) Le nombre de Reynolds atteint en régime permanent, est très supérieur au critérium Re_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 [vitesse moyenne sur l'axe] (Figure 7.41, point A).

⁷⁵ Darrigol (2005, § 6.5) ; Eckert (2021) ; Eckert (2022, § 1.6).

⁷⁶ Baubiac (1936, chap. 1).

b) Le nombre de Reynolds atteint en régime permanent, est voisin du critérium Re_c . L'apparition du régime turbulent se manifeste alors par une baisse lente de la vitesse au point étudié (Figure 7.41, 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.

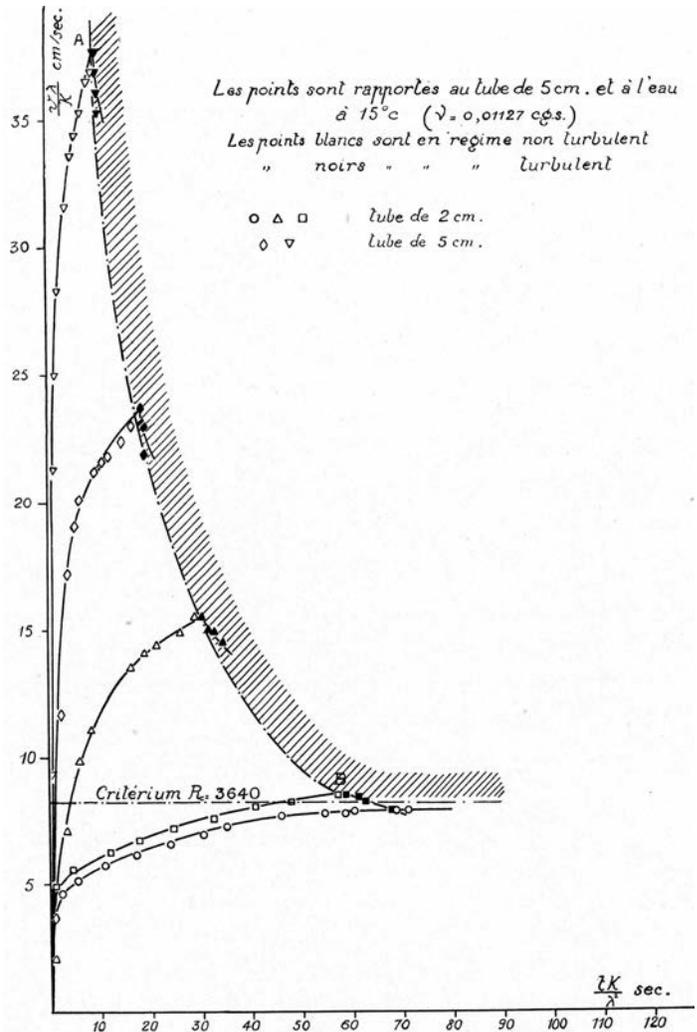


Figure 7.41 Variation en fonction du temps de la vitesse sur l'axe, pour cinq nombres de Reynolds. L'écoulement devient turbulent au-delà de $Re_c = 3640$; la vitesse passe par un maximum à l'instant de la transition, puis diminue légèrement (Baubiach, 1936).

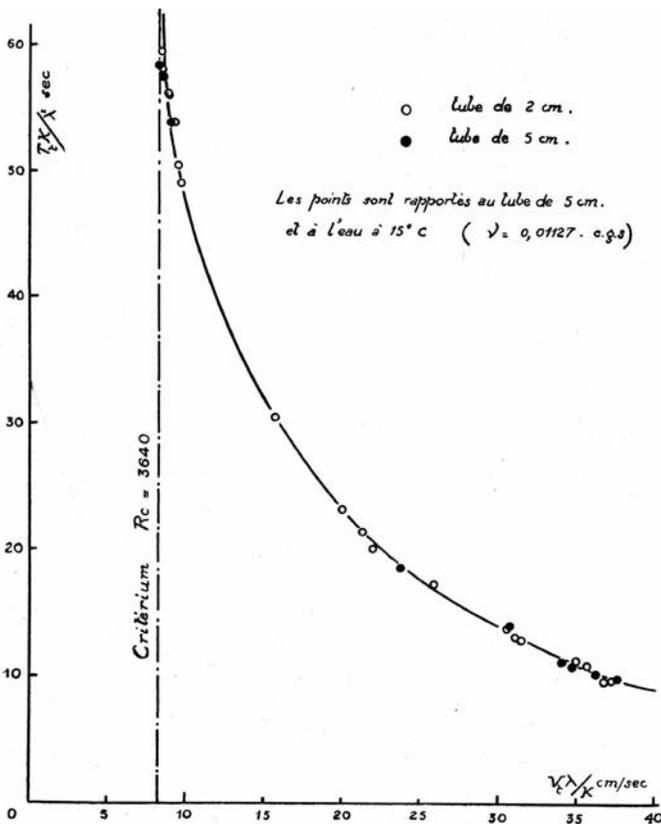


Figure 7.42 Durée de relaxation vers le régime turbulent établi en fonction du nombre de Reynolds terminal (Baubiach, 1936).

On assiste en somme à une lente dislocation du régime non turbulent⁷⁷.

Permutant les deux axes de la Figure 7.41, on obtient la Figure 7.42 qui représente la durée de la transition à la turbulence, $T_t k / \lambda^2$, en fonction de la vitesse terminale $V_t \lambda / k$. Cette vitesse correspond, à un changement d'échelle près, au nombre de Reynolds terminal. L'alignement des points sur une courbe unique, pour deux diamètres de tube et plusieurs hauteurs de charge, montre que le phénomène obéit bien à la similitude de Reynolds.

On voit, conclut Baubiach, 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

⁷⁷ Baubiach (1936, p. 10-11).

Reynolds atteint en régime permanent est plus voisin du critérium Re_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 Re_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 fatalement obligé d'arrêter les expériences à un nombre de Reynolds très voisin de Re_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 Re_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 infini⁷⁸.

Ainsi, pour la transition à la turbulence comme pour l'apparition des tourbillons alternés dans le sillage d'un obstacle (cf. Figure 7.30), il apparaît que la définition la plus pertinente d'un nombre de Reynolds critique doit être fondée sur la divergence à l'infini d'un temps de relaxation. Ce type de considération, aujourd'hui classique dans l'analyse des phénomènes critiques, est dans les années 1930 tout à fait novateur.

Indiquons, pour clore ce chapitre, une étude de la distribution des vitesses dans une couche limite turbulente, étude menée par Crausse en 1935 dans le canal d'aménée de l'usine hydroélectrique de Gentille (Haute-Garonne), lors des essais de réception de cette usine. L'étude se

⁷⁸ Baubiac (1936, p. 15).

réfère, pour le contexte théorique, « à l'exposé que M. Sadron a présenté avec beaucoup de clarté [en 1935] dans les Publications du Ministère de l'Air⁷⁹. » Elle a pour objet 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 réalisées, conclut Crausse, montrent que dans la partie centrale du canal

[les] profils verticaux de vitesse y obéissent avec une bonne exactitude à la loi logarithmique issue des travaux de Prandtl-Kármán. 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.

Ces résultats, une des premières confirmations de la loi logarithmique à l'échelle d'un ouvrage hydraulique ($Re \approx 10^7$), seront publiés en 1943 par l'École française d'ingénieurs de Beyrouth où Crausse a obtenu un poste de professeur.

7.9. Postérité des recherches réalisées

Ainsi que le panorama présenté dans ce chapitre – non exhaustif – a tenté de le montrer, les recherches menées dans l'entre-deux-guerres au laboratoire d'hydraulique de l'IET (absorbé en 1930 dans l'institut de mécanique des fluides de Toulouse) ont été très remarquables, tant par la diversité des questions abordées que par la qualité des résultats obtenus. Elles sont également remarquables par leur manière de conjuguer une « science utile » à l'industrie et une « science désintéressée » curieuse des phénomènes physiques fondamentaux.

Un fil conducteur relie ces recherches et leur donne une grande cohérence, celui de la question de la « similitude des écoulements » considérés à différentes échelles. Cette question de la similitude, remarque Camichel, « présente, du point de vue technique, un intérêt considérable [...]

⁷⁹ Crausse (1943, p. 17) et pages 17 et 39 pour les citations suivantes.

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 représenter⁸⁰. »

Un élément essentiel à ce succès a été le développement d'une instrumentation pointue, notamment la chronophotographie et la cinématographie rapide, permettant d'accéder à des résolutions spatiales inférieures au millimètre et à des résolutions temporelles de l'ordre de la milliseconde. Parmi les plus remarquables, on peut retenir les études sur les transitions entre régimes d'écoulement et les phénomènes de relaxation associés : orientation de veines liquides en relation avec l'hydraulique fluviale, tourbillons alternés dans le sillage d'un obstacle, tourbillons de Kelvin-Helmholtz, et transition à la turbulence en conduite.

Ces recherches ont été pour une large part oubliées après la Seconde Guerre mondiale, lorsque l'activité du laboratoire s'est trouvée entièrement absorbée par les études pour l'industrie de l'hydroélectricité (cf. chap. 8). Redécouvertes, elles témoignent d'une vision anticipant les développements modernes de l'hydrodynamique – notamment sur les sillages, les instabilités et le contrôle des écoulements – et pourraient trouver une bonne place dans les enseignements d'aujourd'hui de la mécanique des fluides.

⁸⁰ Camichel (1929, p. 28).

Chapitre 8

De l'IET à l'ENSEHT

Le progrès était l'horizon des existences. Il signifiait le bien-être, la santé des enfants, les maisons lumineuses et les rues éclairées, le savoir, tout ce qui tournait le dos aux choses noires de la campagne et à la guerre. Il était dans le plastique et le Formica, les antibiotiques et les indemnités de la sécurité sociale, l'eau courante sur l'évier et le tout-à-l'égout, les colonies de vacances, la continuation des études et l'atome. *Il faut être de son temps*, disait-on à l'envi, comme une preuve d'intelligence et d'ouverture d'esprit. En classe de quatrième, les sujets de rédaction invitaient à composer sur « les bienfaits de l'électricité » ou à écrire une réponse à « quelqu'un qui dénigre devant vous le monde moderne ». Les parents affirmaient *les jeunes en sauront plus que nous*.

Annie Ernaux, *Les années*, 2008

L'institut électrotechnique et de mécanique appliquée (IETMA) est transformé en 1948 en École nationale supérieure d'électrotechnique et d'hydraulique de l'université de Toulouse (ENSEHT). Ce chapitre retrace cette transformation et l'histoire des deux premières décennies de la nouvelle école, jusqu'à la veille du bouleversement que marque l'année 1968 pour l'enseignement supérieur et pour l'ensemble de la société française. La première section discute l'évolution du contexte national de la période. La deuxième décrit le nouvel essor que connaissent alors les sciences appliquées à Toulouse, puis présente l'évolution des enseignements à l'ENSEHT. Les trois sections suivantes s'attachent à une brève présentation des laboratoires de recherche dans les trois domaines de l'hydraulique, de l'électrotechnique, et de l'électronique. Une liste des 32 thèses de doctorat d'État soutenues dans ces laboratoires entre 1945 et 1967 est donnée dans l'Annexe A.

8.1. Contexte national de l'après-guerre

8.1.1. Nouveaux enjeux pour l'éducation nationale

Dès la libération du pays et la mise en place du Gouvernement provisoire de la République française, au cours de l'été 1944, une large réflexion sur le système éducatif français est engagée sous l'impulsion du ministre de l'Éducation nationale René Capitant. Une commission est constituée dès le mois de novembre 1944, dont la mission est d'élaborer une réforme globale du système, de l'école maternelle à l'université, fondée sur des principes de démocratisation, de gratuité et de justice sociale¹. Cette commission est présidée par le physicien Paul Langevin puis, après la mort de celui-ci en 1946, par le psychologue Henri Wallon. Le « plan Langevin-Wallon » résultant des travaux de cette commission, remis en juin 1947 au ministre, propose une refonte de l'enseignement secondaire en une école unique, emmenant tous les élèves au niveau du baccalauréat au moyen de « pédagogies nouvelles » plus attentives aux aptitudes des élèves. L'enseignement supérieur et son système des grandes écoles, sévèrement jugés pour n'avoir pas su former des élites à la hauteur de la situation en 1940, seraient profondément restructurés. Les classes préparatoires aux grandes écoles seraient supprimées et ces écoles seraient elles-mêmes transformées en instituts d'université spécialisés, ouverts à tous les candidats titulaires d'une licence². La scolarité universitaire serait alors organisée en trois cycles : un premier cycle préparatoire de deux années, de formation générale et de mise en contact avec les réalités professionnelles ; un second cycle préparant à la licence ; et un troisième cycle de spécialisation (dans les instituts ou écoles) et d'initiation à la recherche. Le plan Langevin-Wallon avance également l'idée d'une carte nationale où

¹ Prost (1968, p. 420-421).

² La réflexion sur l'enseignement supérieur est confiée à une sous-commission, présidée par Langevin, qui comprend notamment les directeurs de l'Enseignement supérieur et de l'Enseignement technique, Pierre Auger et Paul Le Rolland (ancien directeur de l'Institut polytechnique de l'Ouest, à Nantes), et Georges Teissier, directeur général du CNRS de 1946 à 1950.

les universités se distingueraient par l'étendue de leur offre de formation et par leur spécialisation disciplinaire.

Le plan Langevin-Wallon, ambitieux, ne sera pas traduit en réformes effectives, victime de la trop longue durée de son élaboration et des conservatismes et corporatismes divers qui se manifesteront ensuite – de nombreuses autres réformes tentées par la iv^e République subiront le même sort. Certaines de ses propositions pour l'université seront tout de même retenues dans la réforme de la licence ès sciences qui entre en vigueur dès la rentrée scolaire de 1947. Il restera dans les deux décennies suivantes, du fait de sa qualité et de son envergure, une puissante source d'inspiration.

La nouvelle licence ès sciences n'est désormais accessible qu'aux titulaires du baccalauréat. Elle comporte une première année préparatoire de formation générale – dite de « propédeutique » –, à laquelle fait suite une « formation supérieure ». Les études se trouvent donc allongées d'une année³. L'année propédeutique est sanctionnée par un certificat d'enseignement supérieur préparatoire, choisi parmi ceux de mathématiques générales (MG), de mathématiques, physique et chimie (MPC), ou de sciences physiques, chimiques et naturelles (SPCN). La licence correspond à l'acquisition subséquente de quatre certificats – nombre porté à six en 1958 – choisis dans une liste qui en définit la spécialité. La réforme autorise par ailleurs les facultés à doubler les droits de travaux pratiques et de laboratoire, leur octroyant ainsi un peu plus d'aisance financière.

Dans la perspective de l'intégration des grandes écoles dans les universités, comme préconisé par le plan Langevin-Wallon, sont créées en 1947 les Écoles nationales supérieures d'ingénieurs (ENSI)⁴. Une dizaine d'instituts techniques des facultés des sciences, à l'échelle nationale, sont ainsi transformés en ENSI dès l'année suivante. Ces écoles pourront recruter à deux niveaux, celui de l'année préparatoire des facultés et celui des classes de mathématiques spéciales des lycées. Ces dernières seraient à terme supprimées, le recrutement s'effectuant ensuite exclusivement à partir de l'année préparatoire

³ G. Dupouy, doyen, *Rapp. UT 1947-1948*, p. 62-63 ; décret relatif à la licence ès sciences, 11 août 1947.

⁴ Birck & Grelon (2006, p. 74) ; décret du 16 janv. 1947.

organisée dans les facultés. Cet objectif ne sera cependant pas atteint, miné par les résistances de la société des agrégés, des directeurs d'écoles et des associations d'anciens élèves. Les classes préparatoires des lycées perdureront et deviendront même le vivier principal de recrutement des ENSI.

L'argument d'une sélection garante de la qualité des étudiants, avancé par les partisans du maintien des classes préparatoires, ne laisse d'ailleurs pas les facultés indifférentes. Tout en considérant qu'il est de leur devoir d'accueillir tous les bacheliers, qui se pressent toujours plus nombreux à leurs portes, ces facultés s'inquiètent en effet des « lacunes de l'enseignement secondaire », et ne sont pas nécessairement hostiles à des formations visant, comme le déclare le conseil de l'université de Toulouse, « la formation de techniciens d'élite par une sévère sélection à l'entrée et par le niveau élevé de l'enseignement⁵. »

8.1.2. Massification de l'enseignement supérieur

Massification de l'enseignement supérieur. Aux impératifs de démocratisation, se trouve associée dans les années 1950 et 1960 une considérable « massification » de l'enseignement supérieur⁶. À Toulouse, le nombre d'étudiants de la faculté des sciences, qui fluctue autour de 2 000 dans les premières années de l'après-guerre, connaît une forte croissance à partir de 1953-1954 et franchit le cap des 10 000 en 1968 (Figure 8.1). Le phénomène est accompagné dès la fin des années 1940 par une augmentation importante du nombre de postes d'enseignants. À la faculté des sciences de Toulouse, trente et un postes sont ainsi créés entre 1946 et 1949, pour sept maîtres de conférences, onze chefs de travaux et treize assistants ; quatre transformations en postes de niveau supérieur sont également réalisées⁷. Cette expansion bute cependant sur la question des locaux d'enseignement, dont l'insuffisance, dénoncée chaque année plus fortement par les doyens, est dramatique. La faculté des sciences voit ce problème

⁵ G. Boyer, *Rapp. UT 1947-1948*, p. 4.

⁶ Prost (1968, p. 455-458) ; Barrera & Grossetti (2020b).

⁷ G. Dupouy, *Rapp. UT 1948-1949*.

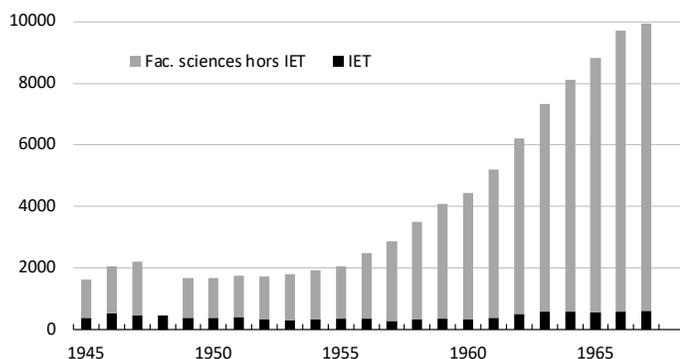


Figure 8.1 Nombre d'étudiants à la faculté des sciences de Toulouse, à l'IET-ENSEHT et hors IET-ENSEHT. Source : *Rapp. UT*.

résolu par son déménagement, à partir de 1961, du Palais universitaire des allées Jules-Guesde vers un nouveau campus, installé dans le quartier de Rangueil au sud de la ville. La réalisation de cette installation – acquisition du terrain de 150 hectares et construction et aménagement des bâtiments – est l'œuvre du doyen Émile Durand⁸.

Un déficit d'ingénieurs préoccupant. À l'accroissement considérable de la population étudiante fait écho une forte demande d'ingénieurs par l'industrie française, demande que les grandes écoles, bridées par le système malthusien des classes préparatoires, sont impuissantes à satisfaire. Henri Longchambon, membre fondateur du CNRS, ancien secrétaire d'État du gouvernement Mendès-France (juin 1954 – fév. 1955) et président du Conseil supérieur de la recherche scientifique et du progrès technique, dénonce ainsi, dans le journal *Le Monde*, la « course folle » aux concours des grandes écoles des plus vaillants des élèves, alors que près des deux tiers des candidats sont ajournés à la propédeutique scientifique. Il faut donc, déclare Longchambon, accroître les « possibilités d'accueil » de l'enseignement scientifique en créant des écoles nouvelles :

La sélection des élites telle que la pratiquent les grandes écoles doit être poursuivie, mais elle ne doit

⁸ Grossetti (1995, p. 41) ; É. Durand, *Rapp. UT* ; N. Meynen, *L'architecture universitaire à Toulouse (xix-xxi^e siècle)*, in (Barrera, 2020a, chap. 7, p. 184-188).

pas exclure l'éducation de masse. La formule des barages successifs par concours – ce meilleur moyen de tirer au sort ! – ne suffit plus⁹.

À l'instigation de Longchambon, est ainsi créé à Lyon, en 1957, un institut national des sciences appliquées (INSA), recrutant sur dossier après le baccalauréat. Un second INSA est ouvert à Toulouse en 1963, sous l'impulsion du directeur de l'enseignement supérieur Laurent Capdecombe, minéralogiste toulousain. La création des Écoles nationales d'ingénieurs (ENI), dans les mêmes années, relève de la même intention de mieux satisfaire la demande de l'industrie.

Décentralisations. Sur le plan de l'aménagement du territoire, les années 1960 sont marquées par une vigoureuse politique de décentralisation de l'État qui va largement profiter à la métropole toulousaine et à son dynamisme économique¹⁰. C'est ainsi que sont transférés à Toulouse une partie du Centre national d'études spatiales (CNES) et trois écoles d'aéronautique : l'École nationale d'ingénieurs de constructions aéronautiques (ENICA, 1961), l'École nationale supérieure de l'aéronautique (Sup'Aéro, 1963-1968), et l'École nationale de l'aviation civile (ENAC, 1968). Ces établissements sont établis sur un nouveau « complexe aérospatial » dans le quartier de Lespinet au sud-est de Toulouse, jouxtant la nouvelle faculté des sciences. Ce quartier accueille en outre un centre de recherche de l'Office national d'études et recherches aérospatiales (ONERA), et deux nouveaux laboratoires universitaires : le Centre d'études spatiales des rayonnements (CESR, associé au CNES) et le Laboratoire d'automatique et de ses applications spatiales (LAAS, laboratoire propre du CNRS).

Le développement toulousain de l'enseignement supérieur apparaît donc essentiellement lié, dans les années 1950 et 1960, à des initiatives de l'État. Les collectivités locales, qui sous la Troisième République s'étaient largement associées à la renaissance des universités – en contribuant notamment à l'essor des sciences appliquées –, voient leur influence passer au second plan.

⁹ *Le Monde* du 17 oct. 1956, cité par Picard (2022).

¹⁰ Grossetti (1995, chap. 1 & 3) ; Grossetti (1996a) ; Grossetti & Zuliani (2013) ; Barrera & Grossetti (2020b).

8.1.3. La recherche, « ardente obligation » politique

Un secrétariat d'État. La recherche scientifique, absente du plan Monnet de reconstruction nationale, ne figure pas dans les priorités des premières années de la IV^e République. La situation s'améliore nettement avec l'accession, en juin 1954, de Pierre Mendès-France à la présidence du Conseil. Un secrétariat d'État à la recherche est alors créé et confié à Henri Longchambon, excellent connaisseur du domaine et, de plus, armé d'une large expérience politique et administrative¹¹. Ce secrétariat coiffe en particulier le Commissariat à l'énergie atomique (CEA) et, par délégation des ministères concernés, tous les organismes de recherche : CNRS, INRA, INH (futur INSERM), ONERA, INED, CSTB, etc.

Un troisième cycle. L'objectif de Longchambon de développer la recherche dans les facultés des sciences se traduit par l'instauration, en 1954, d'un troisième cycle d'études supérieures organisé autour de nouveaux « centres de troisième cycle ». La première année de ce cycle, accessible à tout licencié, est sanctionnée par un certificat (CES) de troisième cycle. La deuxième année prépare à un doctorat défini par une spécialité. À Toulouse, les trois premières spécialités ouvertes, en 1955, sont l'hydrodynamique, la physique électronique, et la physiologie générale. L'année suivante, sont ouvertes, entre autres, les spécialités électronique et mathématiques appliquées. Ces nouvelles formations connaissent immédiatement un fort succès. Le doyen de la faculté se félicite ainsi, en 1961, de la « réussite complète des enseignements de 3^e cycle, [qui] résulte de l'accroissement du nombre de thèses (54 cette année contre 31 l'année dernière) mais aussi de la facilité avec laquelle les docteurs de spécialités trouvent à se placer dans l'industrie¹² ». En 1964 est créé le diplôme d'études approfondies (DEA) qui, se substituant à l'ancien

¹¹ Prost (1988) ; Picard (1990) ; Picard (2022). Un sous-secrétariat d'État à la Recherche scientifique avait été créé par le Front populaire en 1936, confié à Irène Joliot-Curie puis à Jean Perrin, mais ce sous-secrétariat n'avait pas survécu à la chute du Front Populaire.

¹² É. Durand, *Rapp. UT 1960-1961*, p. 135.

diplôme d'études supérieures (DES) vient sanctionner la première année du troisième cycle.

Le colloque de Caen. Porté par le contexte favorable créé par le gouvernement Mendès-France, un événement décisif pour l'avenir de la recherche en France est le colloque réuni à Caen, en novembre 1956, sur la recherche et l'enseignement supérieur. Ce colloque, totalement inédit, a été préparé par Jean-Louis Crémieux-Brilhac (un proche de Mendès-France), Étienne Bauer (chimiste), André Lichnérowitz (mathématicien) et Jacques Monod (biologiste). Présidé par Mendès-France, il rassemble des scientifiques de premier plan, des figures du patronat « modernisateur », des responsables de la haute administration, et des syndicalistes¹³. Ses travaux, résumés sous la forme d'un manifeste en douze points, posent les fondements d'une véritable politique de la recherche, politique qui sera mise en œuvre au cours de la décennie suivante et restera longtemps une référence¹⁴. Le manifeste plaide notamment pour un renforcement des liens entre universités et CNRS, sous la coupe d'un même ministère, et pour un décloisonnement entre universités et grandes écoles. Il y est également fait état d'un besoin, pour les années à venir, de 12 000 nouveaux ingénieurs par an, quand les écoles d'ingénieurs n'en fournissent que 4 000. Le faible taux de réussite à l'université est aussi pointé du doigt. C'est également là que naît la décision de création d'instituts nationaux des sciences appliquées (INSA). Le colloque de Caen sera suivi l'année suivante d'un second colloque à Grenoble, plus spécifiquement dédié aux relations entre science et industrie.

¹³ Parmi les scientifiques, quatre futurs prix Nobel : Alfred Kastler, Jacques Monod, François Jacob, Jean Dausset ; parmi les industriels : Jean Landucci (Kodak-Pathé), Louis Armand (SNCF), Maurice Letort (Charbonnages de France), Maurice Ponte (Compagnie générale de TSF) ; pour l'administration : Gaston Berger (directeur de l'Enseignement supérieur), Gaston Dupouy (directeur du CNRS), Henri Longchambon (président du Conseil supérieur de la recherche scientifique et du progrès technique).

¹⁴ Cinquante plus tard, le livre collectif *Quel avenir pour la recherche ?* (Duclert & Chatriot, 2003) se réclame explicitement de ce colloque, avec une préface signée par plusieurs de ses grands acteurs.

La DGRST. La v^e République promulguée en 1958 amplifie le mouvement amorcé par Mendès-France. Une politique scientifique volontariste est une « ardente obligation », déclare le commissaire au Plan, Pierre Massé. Un comité interministériel de la recherche scientifique et technique (CIRST), présidé par le Premier ministre, est constitué dès le mois de novembre 1958 à des fins de coordination des organismes de recherche placés sous la tutelle des différents ministères. Ce comité est conseillé par un comité consultatif (CCRST) de douze personnalités scientifiques – « comité des Sages » que le Président de la République Charles de Gaulle réunit régulièrement à l'Élysée pour se tenir personnellement informé de l'avancée des travaux de ses membres¹⁵. Le secrétariat de ces deux comités est assuré par un délégué général, Pierre Piganiol, dont les services sont bientôt constitués en Délégation générale à la recherche scientifique et technique (DGRST). Piganiol obtient alors la création d'un fonds de développement de la recherche scientifique et technique, qui va désormais abonder des « actions concertées » sur des thèmes particuliers¹⁶. La DGRST ainsi constituée est une haute administration de la recherche, placée sous l'autorité du Premier ministre et bénéficiant du soutien des plus hautes instances de l'État. Formule souple et originale d'animation scientifique, dotée de très importants moyens financiers, elle sera au cours des deux décennies suivantes un instrument puissant au service d'une véritable politique de la recherche scientifique.

La DGRST s'occupant de la recherche civile, la recherche-développement associée aux programmes militaires est confiée à une Direction de la recherche et des moyens d'essais (DRME). Cet organisme prend notamment en main, en liaison avec le Commissariat à l'énergie atomique (CEA), la constitution d'une force de frappe nucléaire, et prend l'ONERA sous sa tutelle. Des organismes spécialisés sont par ailleurs créés autour

¹⁵ Picard (1990, p. 159-165) ; Prost (1988). Les douze premiers membres du CCRST (ils seront renouvelés par moitié tous les deux ans) sont Jean Bernard, Raymond Latarjet, Charles Sadron, Pierre Aigrain, André Lichnerowitz, Paul Germain, Maurice Ponte, Félix Trombe, Maurice Letort, Pierre Taranger, Louis Chevallier et René Dumont (Germain, 2006, p. 157-165).

¹⁶ Ce modèle sera repris dans les années 1970 par le CNRS avec ses « actions thématiques programmées » (ATP).

d'enjeux stratégiques plus spécifiques, notamment le Centre national d'études spatiales (CNES, 1961), l'Institut de recherche en informatique et automatique (IRIA bientôt INRIA, 1964), et le Centre national pour l'exploitation des océans (CNEXO, 1967). Ces initiatives permettent de porter la part de la recherche à 2,4 % du produit national brut (PNB) en 1968, pourcentage supérieur à celui alors réalisé par l'Allemagne¹⁷.

Le CNRS. Au tournant des années 1960, le CNRS se voit doublement menacé par la puissance des moyens de la DGRST et par l'expansion étudiante¹⁸. La DGRST se trouve en effet en position de lui retirer sa mission de coordination générale de la recherche pour le confiner dans un rôle de simple gestionnaire de la « science lourde ». L'expansion étudiante, quant à elle, est susceptible de lui soustraire ses chercheurs, attirés par les carrières universitaires. Le CNRS parvient cependant à traverser ces écueils, du fait notamment de la clarification du statut de ses personnels (1959) et du renforcement de ses directions scientifique et administrative (1966). Ses effectifs, qui avaient fortement crû, entre 1944 et 1957, de 1 050 à 6 000, doublent encore dans la décennie suivante. Le CNRS se trouve par ailleurs renforcé par la consolidation de ses liens avec les universités, notamment avec la création, en 1966, des « laboratoires associés ». Sélectionnés sur la base de leur qualité scientifique, ces laboratoires sont soumis aux procédures d'évaluation du Comité national de la recherche scientifique. L'institut de mécanique des fluides de Toulouse fait partie des tout premiers laboratoires à obtenir ce statut – il est le « LA 5 ».

Une autre inflexion importante du CNRS est le développement de ses relations avec l'industrie, fortement revendiquée à l'aube des années 1970 par ses directeurs Hubert Curien puis Robert Chabbal. Cette inflexion conduit en 1975 à la création de la Section des sciences physiques pour l'ingénieur (SPI). Cette « section », bientôt renommée « département », regroupe alors quatre sections du comité national : informatique, génie électrique,

¹⁷ Cette part décroîtra par la suite, elle sera de 1,7 % en 1976 (Picard, 1990, p. 252).

¹⁸ Picard (1990, chap. 7-9) ; Guthleben (2013, chap. 4-6).

mécanique, et thermique¹⁹. Son premier directeur est l'automaticien toulousain Jean Lagasse.

Évolution des laboratoires toulousains. Sous la Troisième République, la liaison traditionnelle entre chaire et laboratoire avait entretenu un certain individualisme universitaire, entravant la constitution de véritables équipes de recherche. Toute création d'un poste de professeur ou de maître de conférences engendrait ainsi un nouveau laboratoire, dont les travaux, dans les rapports annuels du conseil de l'université, étaient présentés indépendamment de ceux des autres laboratoires. Cette organisation perdure encore dans les années 1950 – comme en témoigne par exemple, à l'ENSEHT, la multiplication des laboratoires d'électrotechnique et d'électronique – mais elle tend à s'estomper au profit d'une conception plus collective de la recherche. Le doyen de la faculté des sciences de Toulouse écrit ainsi, en 1952 :

La vie scientifique, toujours aussi intense, de notre Faculté se caractérise de plus en plus par une collaboration entre Services. Nous espérons que l'ancien système stérilisant de cloisons entre laboratoires sera bientôt chez nous, remplacé par celui des associations des Laboratoires en vue de larges programmes de recherche.

Cette tendance justifie la création de centres techniques communs, mettant à la disposition de tous les laboratoires les techniques exigeant des spécialistes hautement qualifiés et du matériel coûteux ainsi utilisés à plein rendement²⁰.

Le centre d'optique électronique de Gaston Dupouy répond à ces nouvelles orientations en contribuant à des études de minéralogie et de micropaléontologie – six thèses y sont en cours dès l'année 1945-1946. Le laboratoire de mathématiques appliquées de Roger Huron collabore de même avec différents laboratoires de biologie et de médecine. La constitution de laboratoires regroupant plusieurs dizaines de chercheurs n'apparaîtra cependant

¹⁹ Picard (1990, p. 260-263) ; Guthleben (2013, p. 337-353) ; Ramunni (1995a).

²⁰ L. Capdecemme, *Rapp. UT 1951-1952*.

qu'à la fin des années 1960 (LAAS, CESR, etc.), sous l'égide des grands organismes de recherche.

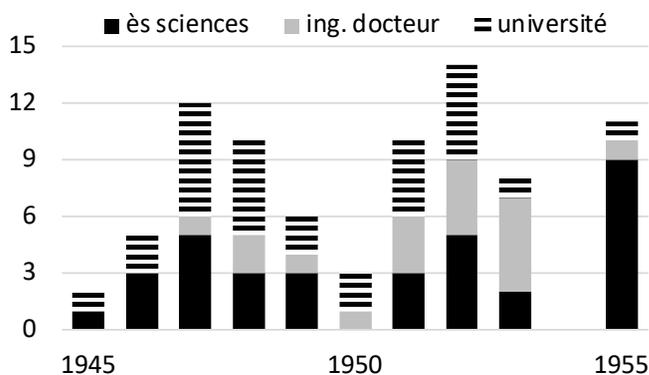
Le nombre annuel de doctorats décernés par la faculté des sciences de Toulouse, qui était de quatre en moyenne avant la guerre, s'établit autour de la dizaine dans la décennie qui suit la Libération (Figure 8.2).

Les bonnes thèses se passent maintenant à Toulouse, déclare le doyen en 1953, et les Professeurs les plus éminents de la capitale ou des autres Facultés consentent à venir chez nous pour faire partie des jurys²¹.

Mais les charges d'enseignement entravent la recherche : « Trop de nos Collègues sont accablés par des heures supplémentaires qu'ils acceptent par devoir²² ». Autre entrave, le manque de place, jugé responsable du petit nombre de thèses (onze) soutenues dans l'année scolaire 1954-1955 :

Étant donnés les besoins de l'Enseignement et de l'industrie, on peut dire que ce nombre est encore trop petit. Cependant, il n'est pas possible à nos Collègues d'accueillir un nombre de chercheurs plus important, car ils ne disposent plus de locaux suffisants. Après avoir aménagé les caves et les combles, la seule solution consistera à construire une nouvelle Faculté²³.

Figure 8.2 Nombre de thèses de doctorat ès sciences, d'ingénieur-docteur et d'université, soutenues à la faculté des sciences de Toulouse entre 1945 et 1955.
Source : *Rapp. UT*.



²¹ É. Durand, *Rapp. UT* 1952-1953, p. 99. Dans la décennie 1930-1939, la faculté des sciences a décerné 20 doctorat ès sciences, 3 doctorats d'ingénieur-docteur, et 19 doctorats d'université.

²² É. Durand, *Rapp. UT* 1953-1954, p. 87.

²³ É. Durand, *Rapp. UT* 1954-1955, p. 86-87.

En dépit de ces difficultés, le nombre de doctorats croît fortement dans les années suivantes, notamment du fait de la création des thèses de troisième cycle. On compte ainsi 51 thèses soutenues en 1960-1961, et 153 en 1966-1967 (26 ès sciences, 21 d'ingénieur-docteur, 11 d'université, et 95 de 3^e cycle).

8.2. De l'IET à l'ENSEHT

8.2.1. Les sciences appliquées à la faculté des sciences de Toulouse

Deux instituts techniques toulousains sont, dès 1948, transformés en Écoles nationales supérieures d'ingénieurs (ENSI) : l'institut électrotechnique, qui devient École nationale supérieure d'électrotechnique et d'hydraulique (ENSEHT), et l'institut agricole, qui devient École nationale supérieure d'agronomie (ENSAT). L'institut de chimie, qui du point de vue administratif était resté un ensemble de « services », est constitué en authentique institut d'université en 1950 et transformé en ENSI en 1953²⁴. Ces transformations d'instituts anciens sont accompagnées par la création de nouveaux instituts, dont deux pour les sciences appliquées : l'institut du génie chimique (1949) et l'institut de calcul numérique (1957).

Le génie chimique, « nouvelle science » apparue aux États-Unis dans l'entre-deux-guerres, a été introduit en France par Joseph Cathala²⁵. Successeur de Sabatier sur la chaire de chimie générale, Cathala a séjourné dans les années 1930 dans les universités québécoises et américaines où il s'est formé au *chemical engineering*, expérience approfondie en Angleterre pendant la guerre. Sa demande de création d'un institut de génie chimique (IGC) à Toulouse est satisfaite en 1949²⁶. L'IGC offre alors aux licenciés ès sciences et aux ingénieurs diplômés un cursus de spécialisation en deux ans. Il est installé au sud

²⁴ É. Durand, *Rapp. UT 1952-1953*, p. 98.

²⁵ Detrez (1996) ; Lamy (2020, p. 424).

²⁶ La création d'un diplôme d'ingénieur du génie chimique a été obtenue l'année précédente, par transformation de celui d'ingénieur électrochimiste lui-même créé en 1921.

de l'île du Ramier sur un terrain de sept hectares concédé à l'université par le ministère des Armées – terrain soustrait à la Poudrerie nationale²⁷.

L'institut de calcul numérique est fondé en 1957 par le physicien Émile Durand, élève de Louis de Broglie et spécialiste de physique mathématique²⁸. Peu après son arrivée à Toulouse en 1949, Durand initie l'enseignement du calcul numérique, nouvelle discipline liée à l'avènement des premiers ordinateurs. L'institut de calcul qu'il fonde est l'un des deux premiers centres français de ce type, l'autre étant celui de Jean Kuntzmann à Grenoble. Durand sera peu après associé à la création de l'option de mathématiques appliquées de l'ENSEHT. Le recrutement de Durand est dû au mathématicien toulousain Robert Deltheil (1890-1972), lui-même recruté par Camichel en 1919 pour les besoins en mathématiques de l'institut électrotechnique. L'épisode est rappelé par Camichel lors des cérémonies de sa réception à l'Académie des sciences, en 1936, Deltheil étant entretemps devenu doyen de la faculté :

Mon cher Doyen, je tiens à vous dire également toute ma reconnaissance. Je suis un peu la cause de votre arrivée à Toulouse et je m'en félicite. Nous avons besoin, à la Faculté, d'un professeur de mathématiques, en particulier pour l'Institut Électrotechnique. J'allai à l'École Normale où vous étiez à ce moment agrégé préparateur. Vos maîtres me dirent tout le bien qu'ils pensaient de vous [...]. Vous fûtes nommé

²⁷ M. Gallais, *Rapp. UT 1949-1950*, p. 8 ; É. Durand, *Rapp. UT 1952-1953*, p. 98.

²⁸ Mounier-Kuhn (2010, p. 261-269) ; Fariñas del Cerro (2015) ; Durand (2006). Émile Durand (1911-1999) est diplômé de l'université de Marseille, agrégé de sciences physiques (1936) et docteur ès sciences (1948). Sa thèse, dirigée par Louis de Broglie, porte sur l'électromagnétisme classique et la théorie quantique de Dirac. Maître de conférences puis professeur (1952) à l'université de Toulouse, il fonde en 1957 l'institut de calcul numérique, lequel préfigure le futur Centre interuniversitaire de calcul de Toulouse (CICT). Il est auteur en 1960 d'un ouvrage de référence sur la résolution numérique des équations algébriques. Doyen de la faculté des sciences de 1953 à 1965, vice-président du conseil de l'université de 1961 à 1964, il est l'artisan de l'installation de la faculté sur un nouveau campus de 150 hectares dans le quartier de Rangueil. Il est élu correspondant de l'Académie des sciences en 1982.

à Toulouse. [...] Vous avez enseigné à l'Institut Électrotechnique pendant une longue période²⁹.

Ce récit témoigne, au passage, des liens étroits que Camichel conservera toujours avec l'ENS. Deltheil est aussi à l'origine du recrutement de Roger Huron, autre pionnier des mathématiques appliquées toulousaines et enseignant à l'IET puis à l'ENSEHT. Huron, qui est également médecin, fondera le premier laboratoire toulousain de statistiques³⁰.

Une troisième ouverture scientifique, au côté du génie chimique et du calcul numérique, s'effectue dans les mêmes années vers l'automatique. Son instigateur est Jean Lagasse, ingénieur IET et chef de travaux au laboratoire d'électrotechnique de l'ENSEHT, pionnier au début des années 1950 du domaine émergent des servomécanismes. Lagasse initie ses recherches au côté de Teissié-Solier, puis crée son propre laboratoire de génie électrique (cf. § 8.4.1).

8.2.2. Les dernières années de l'IET

Personnels. Camichel parti à la retraite en 1941, sa chaire vacante et le poste associé de chef des travaux ont alors été transformés en deux maîtrises de conférences d'électricité industrielle, attribuées à Max Teissié-Solier et

²⁹ Réponse de M. Charles Camichel aux discours en son honneur lors de sa réception à l'Institut, *in* (Association Amicale des Ingénieurs Anciens Élèves de l'IETMA de Toulouse, 1936, p. 51). Sur Deltheil : (Hiriart-Urruty, 2021a).

³⁰ Roger Huron (1913-1997), d'origine ouvrière, agrégé de mathématiques (1939) et professeur de mathématiques en lycée, est recruté en 1947 comme chef de travaux en mathématiques appliquées. Il soutient en 1950, à la faculté des sciences de Paris, une thèse de mécanique des fluides dirigée par Henri Villat, sur les sillages de Helmholtz. Il est nommé maître de conférences en 1952 puis professeur en 1955, sur une nouvelle chaire de mathématiques appliquées. Il obtient la même année un doctorat en médecine de l'université de Toulouse. Ses recherches portent alors sur la résolution automatique des systèmes d'équations linéaires, et sur les statistiques dont il fonde le premier laboratoire toulousain. Enseignant réputé, prix Montyon de l'Académie des sciences (1960), il se distingue par ses nombreuses collaborations avec des biologistes et des médecins (Fariñas del Cerro, 2015 ; Hiriart-Urruty, 2021b).

Pierre Dupin³¹. Tous deux sont nommés professeurs sans chaire en 1946, puis professeurs titulaires, l'année suivante, par transformation de leurs maîtrises de conférences en chaires – l'une d'électrotechnique et l'autre de radiotechnique. Ces transformations sont appuyées par la Ville qui s'engage à continuer à prendre en charge les traitements et indemnités des deux universitaires³².

Trois postes de chef de travaux sont créés dans les deux années suivantes : le premier pour Raymond Birebent (1949), docteur d'État, par transformation du poste d'assistant à l'IET qu'il détient depuis 1941 ; le second pour Jean Lagasse (1950), ingénieur IET préparant une thèse d'électrotechnique sous la direction de Teissié-Solier³³ ; et le troisième pour Jean Nougaro (1951) qui prépare une thèse en hydraulique. L'après-guerre voit par ailleurs un renouvellement notable des personnels techniques, avec en particulier

³¹ C. Camichel, *Rapp. UT 1940-1941* ; arrêté du recteur du 23 oct. 1941.

Paul Frédéric Max Teissié-Solier, né le 22 juillet 1900 à Montech (82), licencié ès sciences physiques et ingénieur IET (1925), entre au laboratoire d'hydraulique de l'IET en novembre 1926 comme ingénieur. Préparateur (1927) puis assistant (1929) et chef de travaux électrotechniques (1929), il soutient un doctorat ès sciences physiques en 1931. Nommé maître de conférence (1941) puis professeur sans chaire (1946), il obtient l'une des deux chaires d'électrotechnique (1^{er} déc. 1948). Deux fois lauréat de l'Institut de France (1936 et 1954) et membre de l'Académie des sciences, inscriptions et belles-lettres de Toulouse (1956). Admis à la retraite en 1967, il décède en 1992 (Arch. nat. F17 29049).

Pierre, Germain, Philippe Dupin, né le 15 fév. 1901 à Rieumes (31), licencié ès sciences physiques (1920) et ingénieur IET (1921), est engagé comme ingénieur à la Compagnie Thomson-Houston (1921-1925) puis au laboratoire d'hydraulique de l'IET (1925-1929). Chargé de cours de télégraphie sans fil à l'IET (1927) puis assistant (1929), il soutient en 1930 un doctorat ès sciences physiques à la faculté des sciences de Paris (rapp. H. Bénard). Lauréat du ministère des Travaux publics (1929) et de l'Institut de France (prix Montyon, 1935). Nommé maître de conférence (1941) puis professeur sans chaire (1946), il obtient l'une des deux chaires d'électrotechnique (1^{er} déc. 1948). Sous-directeur de l'ENSEHT. En congé maladie à partir de septembre 1969, Dupin est admis à la retraite en 1971 (Arch. nat. F17 30287).

³² Conseil de l'univ. du 24 oct. 1947 ; L. Escande, *Rapp. UT 1947-1948* ; le décret de transformation, du 29 nov. 1948, précise que les chaires seraient supprimées si la Ville suspendait sa subvention.

³³ L. Capdecemme, doyen, *Rapp. UT 1949-1950*.

le départ du mécanicien au service de la salle des machines depuis la création de l'IET, M. Delmas, et la démission de la sténodactylo en place depuis 1919, M^{lle} Malvazio.

Un changement institutionnel important survient en 1947 lors de l'absorption du ministère de l'Air dans un ministère des Armées. Les emplois d'université que l'Air finançait depuis 1930 (dont la chaire d'Escande) sont alors transférés au budget du ministère de l'Éducation nationale, avec la subvention de fonctionnement associée. L'intitulé de la chaire de mécanique des fluides est alors modifié en chaire d'électricité industrielle et mécanique des fluides, intitulé cohérent avec le fait qu'Escande, comme précédemment Camichel, cumule les deux directions de l'IET et de l'IMFT³⁴.

Scolarité. L'admission à l'institut était, depuis 1907, ouverte sans examen aux titulaires du baccalauréat ou d'un titre équivalent, et avec examen pour les non-bacheliers³⁵ – ces derniers représentant environ 10 % des admis. La forte augmentation du nombre de postulants aux études d'ingénieur (94 admis en première année en 1943, puis 149 et 203 les deux années suivantes) conduit à l'instauration d'un concours d'admission à partir de la rentrée 1946. Une année préparatoire de « sciences générales » est introduite à la rentrée suivante, en conformité avec la règle prévalant pour les étudiants en propédeutique se destinant à la licence ès sciences. La scolarité s'étend désormais sur quatre années, le concours d'admission intervenant à l'entrée de l'année préparatoire³⁶.

Pour la dernière de son existence, en 1947-1948, l'institut accueille 329 élèves ingénieurs (dont 14 dans la section spéciale de radioélectricité) et 126 élèves conducteurs électriciens-mécaniciens (dont 22 dans la section préparant au brevet d'études techniques en radioélectricité). Une option « mécanique des fluides » est ouverte en 1945-1946 dans la spécialité de mécanique (3^e année), option offrant des cours complémentaires d'aéronautique subventionnés par le ministère de l'Air ; cette option n'attire cependant qu'un seul candidat cette année-là, et aucun par la suite. Le certificat

³⁴ Décret du 6 avr. 1948 (Arch. ENSEEIHT).

³⁵ Règlement de l'Institut électrotechnique et de mécanique appliquée de l'université de Toulouse, oct. 1931, modifié le 17 avr. 1943 par le conseil de l'institut (Arch. ENSEEIHT).

³⁶ L. Escande, *Rapp. UT 1947-1948*, p. 81-84. Une semblable année préparatoire avait été instaurée en 1909 (cf. chap. 4), mais le règlement de 1931 n'y fait plus référence.

de licence de mécanique des fluides se montre plus attractif mais son taux de réussite est faible : on compte, en 1948, seulement sept admis pour 54 candidats à la session de juillet, et neuf admis pour 33 candidats à la session d'octobre.

Léopold Escande (1902–1980)

Né à Toulouse le 1^{er} juin 1902, Léopold Escande est ingénieur de l'IET (1922) et docteur de l'université de Toulouse (1929). Sa thèse porte sur les conditions de similitude des écoulements. Il obtient en 1930 la maîtrise de conférences de mécanique des fluides fondée par le ministère de l'Air, maîtrise transformée en chaire en 1937.

Au départ de Camichel à la retraite, en 1941, Escande prend la direction de l'IET (qui devient ENSEHT en 1948) et de l'IMFT. Passionné d'hydraulique, organisateur entreprenant et charismatique, il se spécialise dans les études d'ouvrages pour l'industrie hydroélectrique dont il devient un personnage influent, sollicité dans de nombreux pays. Il effectue ainsi 180 missions entre 1948 et 1976, et participe à 260 études d'ouvrages. Il publie en 1943 une *Hydraulique générale* en trois tomes (Escande, 1943).



Escande est élu correspondant de l'Académie des sciences en 1953, puis membre l'année suivante. Il obtient dans les années 1960 des crédits importants pour la construction de nouveaux bâtiments, tant à l'ENSEHT qu'à l'IMFT sur l'île du Ramier. Il préside l'Association internationale de recherches hydrauliques (AIRH) de 1960 à 1964, et occupe plusieurs responsabilités académiques, notamment de conseiller scientifique à la DGRST et de président de la section de mécanique générale et mathématiques appliquées (section 3) du Comité national de la recherche scientifique. Il obtient en 1966 l'association au CNRS de l'IMFT (LA n° 5).

En 1970, Escande crée et préside l'institut national polytechnique de Toulouse, qui fédère, en dehors de l'université, quatre écoles d'ingénieurs issues des instituts techniques créés au début du siècle.

Escande est auteur de 502 publications dont 284 notes à l'Académie des sciences. Docteur *honoris causa* de 17 universités étrangères, membre de 21 académies des sciences et de nombreuses sociétés savantes (cf. Annexe D), grand officier de la Légion d'honneur, il est aussi estimé pour ses qualités de professeur et pour sa personnalité, comme en témoigne le doyen Durand : « je voudrais parler de sa bonté, de sa générosité, de son exquise politesse qui est l'apanage des esprits distingués. [...] Sa conversation est toujours un véritable enchantement et l'on est toujours confus par son extrême gentillesse. » Il est également auteur de sonnets. Léopold Escande meurt à Toulouse le 13 septembre 1980^a.

a. Arch. Acad. sc., dossier Escande ; Recueil des discours prononcés lors de la cérémonie de remise de l'épée d'académicien à L. Escande (1956), Arch. IMFT ; (Favre, 1981).

8.2.3. L'ENSEHT de 1948 à 1967

Création. L'institut électrotechnique et de mécanique appliquée (IETMA), fondation de la Ville de Toulouse, est transformé en 1948 en École nationale supérieure d'électrotechnique et d'hydraulique de Toulouse (ENSEHT). Léopold Escande en est nommé directeur.

L'idée de la réforme actuelle, explique le doyen, est de concentrer les efforts à accomplir sur un petit nombre d'instituts qui seront transformés en Écoles Nationales Supérieures d'Ingénieurs. La sélection est faite, sur le plan national, par une Commission siégeant au Ministère : cette sélection est très sévère³⁷.

La transformation n'entraîne pas de modification notable du fonctionnement : l'école, comme auparavant l'institut, possède un budget propre, elle est administrée par un conseil présidé par le recteur, et son personnel titulaire appartient toujours à l'université. L'affiche des années 1950 reproduite sur la Figure 8.3 en résume graphiquement l'histoire : la houille blanche des montagnes, captée par les conduites forcées, est transformée en électricité sous le regard protecteur d'Athéna, tandis que le blason rappelle ce que l'École doit à la Ville de Toulouse. La Figure 8.4 montre, dans les mêmes années, l'entrée de l'ENSEHT sur le boulevard Riquet.

Scolarité. Dans son rapport pour l'année 1948-1949, Escande explique l'organisation générale de la scolarité :

[Le nouveau régime des études] comprend une année dite de « sciences générales » et trois années supérieures. L'admission se fait par voie de concours à deux niveaux : en année de « sciences générales » sur le programme du baccalauréat de mathématiques élémentaires et en première année supérieure sur celui des mathématiques spéciales³⁸.

Les années 1948 à 1951 sont des années de transition où l'ENSEHT est fréquentée, d'une part, par les dernières



Figure 8.3 Affiche de l'ENSEHT vers 1950 (Arch. IMFT, fonds Crausse).

³⁷ G. Dupouy, *Rapp. UT 1947-1948*, p. 63 ; décret du 2 nov. 1948 (Arch. ENSEEIHT).

³⁸ L. Escande, *Rapp. UT 1948-1949*, p. 124.

Figure 8.4 Entrée de l'ENSEHT sur le boulevard Riquet, vers 1950 ; l'inscription sur le fronton rappelle que l'école, originellement un institut, est fondée par la Ville (Arch. IMFT, fonds Crausse).



promotions terminant leurs études sous le régime des instituts et, d'autre part, par les nouvelles promotions entrées sous le régime des écoles nationales. Du fait du nombre réduit de places offertes au concours (une trentaine), le nombre d'élèves diminue alors sensiblement. En 1952, première année où les étudiants sont tous inscrits sous le nouveau régime, l'ENSEHT diplôme trente ingénieurs. Cette même année, le premier niveau de concours est supprimé, et ne subsistera dès lors qu'un unique concours d'entrée en première année supérieure³⁹.

La Figure 8.5 montre l'évolution du nombre de diplômés : la chute au tournant des années 1950, consécutive à l'instauration du concours d'entrée, y apparaît nettement et n'est rattrapée qu'une décennie plus tard. Le nombre de places offertes au concours croît ensuite

³⁹ Lettre du Ministre au recteur, 30 mars et 13 nov. 1951 (Arch. ENSEIHT).

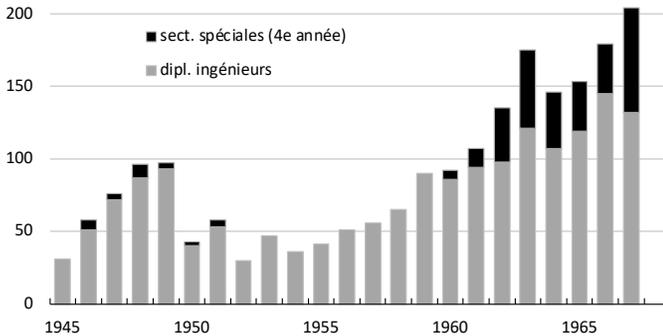


Figure 8.5 Nombre d'ingénieurs diplômés de l'IET-ENSE(E)HT entre 1945 et 1968, et de diplômés des sections spéciales (4^e année). Source : *Rapp. UT*.

régulièrement, pour atteindre cent dix en 1967. Cette année-là, le nombre total d'étudiants de l'école est de 619, année préparatoire et années spéciales comprises (107 et 36 étudiants, respectivement). La faculté des sciences, en pleine croissance, compte alors 10 000 étudiants. L'importance relative de l'école a alors fortement diminué : tandis que l'IET rassemblait en 1913 plus de la moitié des effectifs de la faculté, l'ENSEHT en 1967 (devenue ENSEEHT) n'en rassemble plus que 6 %. On voit là une illustration de l'effet, évoqué plus haut, du malthusianisme du système des classes préparatoires et des concours d'entrée.

Nouvelles options et années spéciales. À partir de 1955, la scolarité est structurée en un tronc commun d'une année, suivi d'une spécialisation de deux années en hydraulique ou en électrotechnique. Une troisième spécialisation d'électronique est créée l'année suivante. Le mot « Électronique » est alors ajouté au nom de l'école, dont le sigle devient ENSEEHT. En 1958, année à partir de laquelle les spécialités sont mentionnées dans le titre d'ingénieur, sont ainsi diplômés 29 ingénieurs électrotechniciens, 23 électroniciens et 13 hydrauliciens⁴⁰.

Une quatrième option est créée en 1959, de mathématiques appliquées. Le contexte, argumente Escande, est celui « du nombre croissant de machines à calculer électroniques utilisées dans les services scientifiques

⁴⁰ *Rapp. UT* 1957-1958, p. 191.

des industries, ainsi que dans divers laboratoires de recherches. » Deux autres arguments sont avancés⁴¹ :

- l'existence, à la faculté des sciences, d'un service de calcul numérique, créé et dirigé par le doyen Durand, « service doté d'un équipement important, en particulier d'un ordinateur IBM 650 et une machine analogique SEA » ;
- la possibilité d'une collaboration étroite de l'école avec ce service, « le doyen Durand ayant accepté de diriger et d'assurer, avec ses collaborateurs, les enseignements et travaux pratiques nécessaires pour assurer la formation plus spécialisée indispensable à ces futurs ingénieurs. »

L'informaticien Luis Fariñas racontera ainsi, un demi-siècle plus tard, les débuts de l'enseignement de l'informatique à Toulouse :

Dès la fin des années cinquante, sous l'impulsion d'É. Durand, M. Laudet et J. Lagasse, les premiers cours d'informatique commencent à se mettre en place. Des enseignements de la section de mathématiques appliquées de [l'ENSEHT] et de la Faculté des Sciences sont proposés autour de l'optimisation, de l'approximation, de l'informatique numérique, de la structure des données, de la programmation ou de l'architecture des machines. Ces formations sont complétées par des cycles de conférences données par des ingénieurs de l'industrie informatique et du grand Centre de Calcul de Sud-Aviation. Cet ensemble de formations témoigne de la richesse de l'informatique toulousaine dans les années soixante⁴².

Claude Thirriot, alors stagiaire de recherches au CNRS et pionnier du calcul numérique appliqué à l'hydraulique, donne une image vivante des premières machines :

L'IBM 650 ! Imaginez un ensemble d'armoires métalliques massives et bruyantes occupant deux grandes

⁴¹ L. Escande, Dossier de demande de création à l'ENSEEHT d'une option mathématiques appliquées et d'une section spéciale de mathématiques appliquées, 9 déc. 1958 (Arch. ENSEEIHT).

⁴² Fariñas del Cerro (2015).

pièces climatisées de l'ancienne Faculté des Sciences [sur les allées Jules Guesde]. L'unité centrale avait un cœur vibrant et sonore : le tambour magnétique avec, luxe incroyable, 2 000 positions de mémoires à 10 chiffres. Et nous, fidèles experts de la règle à calculer, nous restions émerveillés devant ce prodige de la technologie américaine⁴³.

Au tournant des années 1960, sont également créées à l'ENSEEHT quatre « sections spéciales » offrant aux ingénieurs déjà diplômés, en une année, une spécialisation en hydraulique (1958), en mathématiques appliquées (1959), en électrotechnique (1960) ou en électronique (1962).

À l'instigation de Jean Lagasse, les enseignements d'automatique se développent. Deux diplômes d'études supérieures techniques sont créés en 1962, en automatique et en calcul automatique, ouverts aux licenciés ès sciences. L'année suivante, le certificat d'études supérieures (CES) d'électronique industrielle voit le mot « automatique » ajouté à son libellé. En 1965, est créée une section spéciale d'automatique.

L'option de mathématiques appliquées est rebaptisée « informatique » en 1967 et sa direction est confiée à Michel Laudet, élève de Durand et professeur à la faculté des sciences⁴⁴. Les options électronique et

⁴³ C. Thirriot, *Préhistoire de l'informatique à l'IMFT, 1958-1970* (1998), Arch. IMFT.

⁴⁴ Michel Laudet (1921-2003), ancien élève de l'École normale supérieure de l'enseignement technique (ENSET), est docteur en médecine (bio-anthropologie) et docteur en physique (calcul numérique appliqué à l'optique électronique, 1958, dir. Durand). Successivement assistant de physique (1950), chef de travaux de mathématiques (1955) et maître de conférences en physique théorique et calcul numérique (1957), il est nommé en 1959 professeur sans chaire dans le service de physique mathématique, puis professeur à titre personnel (1960). Il enseigne alors l'informatique, dont il est un pionnier, avec un intérêt particulier pour l'informatique médicale. En 1963, Laudet crée le Centre d'informatique de Toulouse (CIT), premier laboratoire de recherche dans le domaine. En 1967, il est le premier directeur de l'Institut de recherche en informatique et automatique (IRIA futur INRIA), qu'il dirige pendant cinq ans. Laudet a également dirigé l'institut de la Promotion supérieure du travail de Toulouse (1958). Sources : Fariñas del Cerro (2015), *Rapp. UT*.

électrotechnique sont alors fusionnées en une seule option « électronique » dirigée par Jean Lagasse. Le mot « informatique » est ajouté au nom de l'école et, dans un souci de concision et « après beaucoup d'hésitations », le mot « électrotechnique » y est supprimé. Mais ce dernier est réintroduit deux ans plus tard, la suppression s'avérant regrettable, avoue Escande, « tant au point de vue du recrutement qu'à celui des réactions provoquées chez les principaux employeurs de nos ingénieurs, telle que, en particulier, l'Électricité de France⁴⁵ ». Suppression regrettable sans doute aussi du fait de mécontentements internes ! L'école, dont le sigle devient ENSEIHT, comportera désormais quatre options : électrotechnique, électronique, informatique et hydraulique.

Certificats d'enseignement supérieur (CES). La scolarité à l'ENSEHT associe, d'une part, des enseignements ouverts à tous les étudiants de la faculté des sciences et, d'autre part, des enseignements spécifiques à la formation d'ingénieur. En 1954, les étudiants de première année suivent ainsi, à la faculté, les certificats d'analyse appliquée et de physique générale. Les certificats de licence se diversifient largement dans les années 1950 et 1960, notamment en 1959 où entre en vigueur un nouveau régime de la licence.

Le gros événement de cette année, déclare alors le doyen, est la mise en train du nouveau régime de la licence ès sciences. Cela nous a amenés à accroître considérablement le nombre des cours et des travaux pratiques⁴⁶.

La création, en 1964, du diplôme d'études approfondies (DEA) entraîne également une diversification des certificats de troisième cycle.

Les statistiques sur les certificats enseignés à l'ENSEHT sont déclarées par Escande dans ses rapports annuels pour la faculté, sous les rubriques des trois « services » d'hydraulique, d'électrotechnique, et d'électronique – chaque service pouvant regrouper plusieurs

⁴⁵ L. Escande au directeur des Enseignements supérieurs du ministère de l'Éducation nationale, le 19 mai 1967 et le 25 janv. 1969 ; réponse du ministère du 7 août 1969 (Arch. ENSEIHT).

⁴⁶ É. Durand, *Rapp. UT 1958-1959*, p. 111.

laboratoires. On tente ci-dessous une synthèse de ces statistiques, jusqu'à l'année 1965 où elles disparaissent des rapports.

- a) Dans le service d'hydraulique, le nombre de certificats de licence passe, dans les années 1950, de un à quatre :
- mécanique des fluides : certificat créé en 1930 à l'instigation du ministère de l'Air, délivré à une trentaine d'étudiants par an (avec de fortes fluctuations d'une année à l'autre) ;
 - mécanique appliquée : créé en 1957 avec l'option hydraulique de l'ENSEEHT, une vingtaine de certifiés par an ;
 - hydraulique générale et appliquée : créé en 1959, une douzaine de certifiés par an ;
 - mécanique des sols : créé en 1960, 15 à 20 certifiés par an.

À la création du 3^e cycle d'hydrodynamique, en 1955, vient s'ajouter un certificat éponyme qui diplôme une petite dizaine d'étudiants chaque année.

- b) Dans le service d'électrotechnique, les certificats évoluent beaucoup⁴⁷. Pour la licence, apparaissent à la fin des années 1950 plusieurs certificats :
- électrotechnique : créé en 1956, 20 à 40 certifiés par an ; il s'agit de la continuation, sous une nouvelle dénomination, du certificat d'électricité industrielle créé en 1920 ;
 - électricité industrielle : créé en 1959, 6 à 30 certifiés par an ;
 - servomécanismes : créé en 1959, 20 à 30 certifiés par an.

À l'ouverture du centre de troisième cycle d'électronique industrielle, en 1957, est créé un certificat d'électrotechnique et électronique industrielles. Ce certificat est scindé deux ans plus tard en deux certificats distincts, d'électricité industrielle d'une part et d'électronique industrielle d'autre part.

⁴⁷ Les rapports annuels montrent une certaine confusion dans les dénominations des certificats, liée aux évolutions de la discipline et à la complexité de l'organisation des laboratoires de Teissié-Solier et de Lagasse. Nous espérons que le tableau ici présenté est juste.

Le second est renommé « électronique industrielle et automatique » en 1963, puis lui-même scindé en deux options : électronique industrielle, et automatique. Une vingtaine de certificats sont délivrés dans chaque spécialité. Un certificat de technologie offre une mention automatique à partir de 1963, délivré à une douzaine d'étudiants.

- c) Dans le service d'électronique, apparaissent dans les années 1950 trois certificats de licence :
- radioélectricité, créé en 1956 et renommé radio-technique en 1959, 15 à 30 certifiés par an ;
 - électronique : créé en 1959 et très prisé des étudiants, 60 à 120 certifiés par an (jusqu'à 300 examinés !) ;
 - semiconducteurs : créé en 1959, 12 à 50 certifiés par an.

Pour le troisième cycle, le certificat précité d'électronique industrielle offre une option « électronique et haute fréquence » qui diplôme une douzaine d'étudiants.

Le taux de réussite à ces certificats, toutes spécialités confondues, est compris entre 30 % et 50 %, et moins encore pour les servomécanismes. Cette faiblesse se retrouve dans la plupart des certificats de licence et fait alors l'objet de nombreuses critiques dénonçant un « gâchis ».

En 1967, la durée du premier cycle universitaire est portée à deux ans (réforme Foucher). L'année préparatoire au concours d'admission à l'ENSEEHT, jusque-là annexée à l'ENSEEHT, alors disparaît⁴⁸. Le concours, commun à plusieurs ENSI, est désormais préparé uniquement dans les classes préparatoires des lycées. Un recrutement d'étudiants issus des facultés, organisé par le ministère, est toutefois maintenu.

École des conducteurs électricien-mécanicien. Des évolutions interviennent également dans la formation au brevet de conducteur électricien-mécanicien. Cette formation rassemble une cinquantaine d'étudiants dans chacune de ses deux années, auxquels s'ajoute une quarantaine

⁴⁸ L. Escande, *Rapp. UT 1966-1967*, p. 412.

d'étudiants dans la troisième année de spécialisation en radiotechnique. Cette formation quitte formellement le giron de l'ENSEEHT en 1956, comme l'explique Escande :

Pour des motifs d'ordre administratif, l'École de Conducteurs Électriciens Mécaniciens de l'Université de Toulouse, fondée en 1907, a été transformée en Section d'Électrotechniciens et de Radiotechniciens de l'École Nationale d'Enseignement Technique de Toulouse, à partir du 1^{er} janvier 1956 [...]. Cette transformation ne modifie en rien la formation des Électrotechniciens et des Radiotechniciens qui reste toujours assurée dans les locaux de [l'ENSEEHT]⁴⁹.

La durée de la préparation aux brevets nationaux d'électrotechnicien et de radiotechnicien est alors portée de deux à trois ans.

Extensions des locaux. En 1945, Escande sollicite la Ville pour une extension de l'IET sur un terrain communal situé en bordure de la rue Riquet, terrain devenu vacant par suite de l'incendie par les Allemands, en 1944, de l'École supérieure de jeunes filles. Cette cession est réalisée en 1952, avec la contrepartie que l'université rétrocède à la Ville un autre terrain jusque-là occupé par une station de mécanique agricole de la faculté des sciences.

Le grand projet d'extension de l'ENSEHT, déclare alors le doyen de la faculté, est maintenant entièrement approuvé, et l'on peut espérer voir donner prochainement les premiers coups de pioche⁵⁰.

Le terrain cédé, d'une superficie de 8 377 mètres carrés, exclut une parcelle comprenant la chapelle située à l'angle des rues Riquet et Caraman, ainsi que quelques bâtiments attenants⁵¹. Cette parcelle est toutefois promise à l'EN-

⁴⁹ L. Escande, *Rapp. UT 1955-1956*, p. 157. Les statistiques relatives à ces formations disparaissent des rapports à compter de cette année-là.

⁵⁰ É. Durand, *Rapp. UT 1952-1953*, p. 98-99 ; L. Escande, *Rapp. UT 1944-1945* ; convention du 12 mai 1952 (Arch. ENSEEIHT).

⁵¹ Il s'agit de la chapelle désaffectée où s'était installé l'institut de mécanique des fluides de Lille pendant la guerre (cf. chap. 6). À la Libération, la chapelle reste occupée par le Groupement des recherches aéronautiques (GRA) qui y maintient une soufflerie.

Figure 8.6 Charles Camichel et le recteur Paul Dottin à l'entrée de l'ENSEEHT au 2 rue Camichel, en 1962 (Arch. IMFT). Dottin (1895-1967), professeur de langue et littérature anglaises à la faculté des lettres de Toulouse (1931-1944), doyen de cette faculté (1937-1944) puis recteur de l'académie de Toulouse (1944-1963) (Barrera, 2020*d*), a également été une grande figure de la Résistance.



SEHT, mais l'opération tardera à aboutir – du fait de problèmes de relogement de services municipaux occupant les lieux et de retards dans l'opération immobilière. La cession – une vente en bonne et due forme à l'université – ne sera effective qu'en 1967⁵². L'ENSEHT occupe désormais la totalité des terrains situés dans le périmètre des quatre rues (boulevard Riquet, rue des Écoles, rue Riquet, et rue Caraman rebaptisée Sylvain Dauriac). La chapelle sera bientôt détruite. En 1962, la rue des Écoles est rebaptisée rue Camichel, à l'occasion de la célébration du cinquantième de la fondation de l'institut électrotechnique (Figure 8.6).

En 1967, un projet de déménagement sur le campus de Rangueil est évoqué par le recteur :

Quant à l'École nationale supérieure d'électrotechnique, d'électronique et d'hydraulique, non seulement elle a changé de nom et introduit l'informatique dans

À l'échéance du bail entre la Ville et le GRA, en décembre 1947, la Ville cède le bâtiment à l'IET. Ce dernier autorise le GRA (devenu ONERA) à y poursuivre des expériences pour une durée d'un an, autorisation renouvelable par tacite reconduction (Arch. ENSEEIHT).

⁵² Lettre du maire à L. Escande, 13 janv. 1953 ; acte d'acquisition amiable par l'État du 30 janv. 1967 (Arch. ENSEEIHT).

son label de qualité mais enserrée, rue Camichel, dans des murs trop étroits, elle a décidé elle aussi d'émigrer, non loin d'ici, près de la Faculté des Sciences, sur un vaste terrain⁵³.

Ce projet n'aboutira cependant pas, l'école demeurera sur son site originel.

8.3. Le laboratoire d'hydraulique

Cette section et les deux suivantes présentent un panorama de l'activité, jusqu'en 1967, des laboratoires de recherche : celui d'hydraulique fondé en 1913, celui d'électrotechnique fondé en 1946, et celui de radioélectricité fondé en 1948. Deux autres laboratoires naîtront ensuite de scissions.

8.3.1. L'âge d'or de l'hydroélectricité

Léopold Escande expert réputé. Le laboratoire d'hydraulique de l'IET avait été créé en relation avec l'essor de l'hydroélectricité dans les Pyrénées et le Massif central (cf. chap. 5). Cet essor se poursuit après la guerre : la production nationale d'électricité est alors pour moitié d'origine hydraulique, entraînée par la nouvelle société nationale Électricité de France, créée en 1946. Le laboratoire toulousain se trouve donc dans une position stratégique. Léopold Escande, qui, pendant l'occupation du pays, a consolidé son expertise et obtenu de la Ville un « laboratoire plat » pour ses modèles réduits d'ouvrages hydrauliques, engage alors toutes ses forces dans les études que lui ordonne l'industrie française. Son expertise et ses conseils en font un personnage influent dont la réputation s'étend au-delà des frontières du pays⁵⁴. Son rapport pour le conseil de l'université pour l'année 1947-1948, dont quelques lignes sont reproduites ci-dessous, témoigne de l'importance de son réseau de relations :

M. Escande, Directeur, a été nommé chevalier de la Légion d'honneur au titre du ministère du Commerce

⁵³ M. Loyen, recteur, *Rapp. UT 1966-1967*, p. 9-10.

⁵⁴ Rouse (1976).

et de l'Industrie, sur proposition de la Direction de l'Électricité, par décret du 21 janvier 1948. [...]

M. Escande a assisté à la réunion de l'Association Internationale de Recherches pour Travaux Hydrauliques qui s'est tenue à Stockholm les 7, 8 et 9 juin 1948. Il a présenté un rapport et fait une communication accompagnée d'un film sur les recherches récentes de nos laboratoires concernant le fonctionnement des barrages mobiles.

D'autre part, M. Escande a été chargé, par la Direction des Relations culturelles du ministère des Affaires étrangères, d'une mission officielle de conférences et de liaison avec les services techniques du Chili, de l'Argentine, de l'Uruguay et du Brésil.

Au cours de cette mission, qui s'est étendue du 25 juillet au 15 septembre 1948, il a été ainsi amené à faire des conférences sur les travaux des laboratoires d'hydraulique de Toulouse aux ingénieurs spécialisés et à coopérer à leurs études à Santiago-du-Chili (5 conférences), Buenos Aires (5 conférences), Montevideo (3 conférences), Rio de Janeiro (3 conférences), Porto Alegre (3 conférences), São-Paulo (4 conférences), Belo Horizonte (une conférence) et Recife (une conférence).

Il a également visité l'usine de Sauzal, au Chili ; celle du río Negro, en Uruguay ; celle de Coubatao, dans l'État de São Paulo ; ainsi que le chantier de la Chute de Paolo-Alfonso, dans l'État de Pernambuco⁵⁵.

L'année suivante, Escande rend compte d'une activité semblable, tournée cette fois vers l'Espagne et le Portugal. Il fait aussi état d'un prix attribué par l'Académie des sciences :

L'Académie des sciences a attribué, pour 1949, à M. Escande, directeur, déjà titulaire du Prix Bazin, le Prix Pierson-Perrin⁵⁶.

Il préside cette année-là le comité d'organisation d'une Exposition nationale de l'Électricité au parc des Sports de Toulouse.

⁵⁵ L. Escande, *Rapp. UT 1947-1948*, p. 82-83.

⁵⁶ L. Escande, *Rapp. UT 1948-1949*, p. 124.

Le réseau de relations tissé par Escande lui permet d'obtenir dans les années suivantes d'importantes subventions tant de l'industrie que des ministères⁵⁷. En février 1959, le laboratoire reçoit la visite du Général de Gaulle, venu prononcer devant les étudiants toulousains un discours mémorable sur l'enseignement et la recherche – De Gaulle visite également le laboratoire de microscopie électronique de Gaston Dupouy⁵⁸. La réputation d'Escande lui vaudra de nombreuses distinctions académiques, en particulier de docteur *honoris causa* de dix-sept universités étrangères et de membre (ou correspondant) de vingt-et-une académies des sciences – la liste en est donnée dans l'Annexe D.

Activité du laboratoire. Les études réalisées au laboratoire portent sur les différents types d'ouvrages hydrauliques mis en œuvre par l'industrie hydroélectrique, tels que déversoirs, évacuateurs de crues, prises d'eau, barrages mobiles, et chambres d'équilibre des conduites forcées. Le « laboratoire plat » (Figure 8.7) est géré par son directeur technique, Louis Castex, qui dirige plusieurs dizaines de techniciens et ouvriers. Castex est assisté par Jean Nougaro (docteur d'État en 1952) et par Jean et Albert Claria (conducteurs électriciens, docteurs d'université en 1961, le premier en hydraulique et le second en aérodynamique). Une plaquette de présentation des laboratoires d'hydraulique de l'IMFT, en 1959, témoigne d'une activité considérable. Une liste des travaux réalisés depuis 1913 y fait état de 136 études sur modèle réduit – pour 19 pays sur les cinq continents – et 37 calculs de cheminées d'équilibre (sujet favori d'Escande)⁵⁹.

Revers de la médaille, les recherches en mécanique des fluides plus fondamentale, qui avaient fait du laboratoire de Camichel un centre aussi réputé que celui

⁵⁷ L. Escande et J. Nougaro, La recherche en France. Liaison entre la recherche universitaire et la recherche industrielle. *La machine-outil*, n° 142, avr. 1959, 65–77.

⁵⁸ Un enregistrement de ces visites et du discours est accessible dans les archives de l'INA : <https://fresques.ina.fr/de-gaulle/fiche-media/Gaulle00027/discours-a-l-universite-de-toulouse.html>

⁵⁹ Les laboratoires d'hydraulique de l'École nationale supérieure d'électrotechnique, d'électronique et d'hydraulique de Toulouse. Éd. Privat (1959).



Figure 8.7 Le « laboratoire plat » des maquettes d'hydraulique dans les années 1950 ; au fond, le bâtiment de la soufflerie ; à droite, la couverture du canal rectiligne.

d'Henri Bénard à Paris, disparaissent. Le changement de perspective apparaît nettement dans la thèse de docteurat ès sciences de Jean Nougaro, ingénieur IET (1946) et assistant d'Escande. Soutenue en 1952, il s'agit de la première thèse depuis celle, d'ingénieur-docteur, soutenue en 1939 par Luis Castagnetto⁶⁰. Elle rapporte une étude expérimentale des vagues déferlantes – dites « intumescences » – se propageant dans les canaux, vagues de même nature que les mascarets des rivières. Il s'agit d'un problème d'hydrodynamique classique, étudié notamment par Boussinesq au siècle précédent, susceptible

⁶⁰ Cf. Annexe A pour la liste des thèses. Une thèse de docteurat ès sciences sur « la convection naturelle par les fils et les cylindres », financée par le GRA et réalisée à l'IMFT, aurait été soutenue en 1943 par Charles Bory, mais, comme indiqué au chapitre 6, cette thèse n'a laissé d'autre trace qu'une mention par le doyen dans son rapport annuel.

d'intéressants approfondissements. Mais le contenu scientifique de cette thèse apparaît en net retrait par rapport à celui des thèses des années 1930 (cf. chap. 7). La bibliographie y est très succincte – la seule référence du premier chapitre, de présentation générale des ondes de surface, est l'ouvrage d'hydraulique d'Escande⁶¹. Cette thèse amorce toutefois un redémarrage de la recherche toulousaine. Trois thèses d'ingénieur-docteur sont ainsi soutenues en 1953 et 1954, et une thèse d'État en 1955 (Sébastien Gerber). La création en 1955 du centre de troisième cycle d'hydrodynamique, et, à l'échelle nationale, l'importance stratégique que prend la recherche scientifique, inaugurent une nouvelle ère.

Publications. Le peu de travaux de thèses, jusqu'en 1955, n'empêche pas Escande de publier ses propres travaux à un rythme soutenu. Le Tableau 8.1 résume la production scientifique entre 1929 et 1955, par tranche de cinq années (sept années pour la première tranche)⁶². Cette production est constituée pour l'essentiel de notes aux *Comptes rendus de l'Académie des sciences (C. R.)*, d'articles dans des revues nationales et de communications à des colloques nationaux. On y trouve trois volumes des *Publications Scientifiques et Techniques du ministère de l'Air* : un rapport, par Camichel et Escande, des travaux réalisés au laboratoire entre 1913 et 1938 (356 pages), et deux rapports d'Escande sur ses propres travaux⁶³. Les publications internationales sont rares : on ne trouve en particulier qu'une seule participation aux Conférences internationales de mécanique appliquée (ICAM) – celle de 1930 à Cambridge (Massachusetts) – et celles des années 1950 correspondent aux Actes des congrès de l'Association internationale des recherches hydrauliques (AIRH). À ces publications s'ajoute un ouvrage

⁶¹ Escande (1950).

⁶² Le Tableau 8.1 a été établie à partir de la liste des publications donnée dans une plaquette, publiée en 1959, de présentation des laboratoires d'hydraulique (Escande, 1959) (Arch. IMFT). Une seconde plaquette, publiée en 1966, est focalisée sur les études pour l'industrie et ne donne plus les publications scientifiques.

⁶³ Camichel & Escande (1938) ; Escande (1940, 1943). La seconde PST fait l'objet d'une réédition en 1946.

d'Escande, *Hydraulique générale*, en trois tomes publiés à partir de 1943 et réédités en 1950⁶⁴.

Tableau 8.1 – Publications de l'IMF de Toulouse entre 1929 et 1955 : C. R. Acad. sc., autres nationales françaises (dont PST du ministère de l'Air), nationales étrangères, journaux et congrès internationaux (dont ICAM), thèses (dont ès sciences). Source : Arch. IMFT.

	1929-35	1936-40	1941-45	1946-50	1951-55
C. R. Acad. sc.	42	26	33	28	58
Autres nat. fr. (PST)	43	15 (2)	13 (1)	26 (1)	28
Nat. étrangères	1	0	0	10	12
Internat. (ICAM)	4 (1)	0	0	2	8
Thèses (ès sciences)	5 (5)	3 (1)	0	0	5 (2)
Total	95	44	46	66	107

Une différence frappante distingue les périodes antérieure et postérieure à la guerre. Avant 1939, les publications sont en général cosignées par plusieurs auteurs, et portent pour la plupart sur des questions générales de mécanique des fluides. De 1939 à 1955, 80 % des 225 publications sont signées d'Escande seul, et portent exclusivement sur l'hydraulique des ouvrages

⁶⁴ Escande (1950). L'hydraulique présentée dans cet ouvrage (ses trois tomes et leurs deux éditions), très complète sur les aspects techniques, fait cependant peu de place aux avancées de la mécanique des fluides au cours du xx^e siècle. La couche limite y est traitée en quelques lignes, sans équation, essentiellement pour dire qu'elle peut être résorbée par aspiration. La turbulence est également traitée sommairement ; il est notamment affirmé – faussement – que les moyennes des produits de fluctuations de vitesse sont *toutes* nulles (la turbulence ne peut dès lors intervenir que par l'introduction dans les équations d'une viscosité arbitraire, comme l'avait fait Saint-Venant un demi-siècle avant Reynolds). Comparant des mesures de vitesse instantanée, dans un canal, au profil des vitesses moyennes, Escande observe que les vitesses instantanées s'écartent peu des vitesses moyennes, pour en conclure que la turbulence ne joue pas de rôle important : il semble ignorer que le profil moyen est lui-même déterminé par les fluctuations. L'ouvrage fait l'objet, en 1943, d'une recension sévère par Yves Rocard. Celui-ci reconnaît les qualités de clarté du premier tome mais déplore notamment, pour le second, que « le point de vue théorique qui aurait donné une grande unité à ces questions soit assez délibérément négligé ».

hydroélectriques – dont une bonne partie sur les chambres et cheminées d'équilibre. Il faut attendre 1955 pour voir les travaux se diversifier, en liaison avec la création du troisième cycle d'hydrodynamique.

8.3.2. Le renouveau scientifique des années 1960

Diversification des recherches. L'exceptionnel savoir-faire expérimental développé par Camichel et son équipe, perdu lors de la dispersion de cette équipe au début de la guerre, se reconstitue progressivement au cours des années 1960 avec l'arrivée d'une nouvelle génération de chercheurs. Signe avant-coureur du renouveau, le « laboratoire d'hydraulique » prend à partir de 1955, dans les rapports du conseil de l'université, la dénomination plus ouverte de « laboratoire d'hydraulique et de mécanique des fluides » – changement concomitant à la création du troisième cycle d'hydrodynamique.

Entre 1955 et 1967, 12 thèses de doctorat ès sciences sont soutenues, ainsi que 30 d'ingénieur-docteur, 26 d'université, et 47 de troisième cycle (Figure 8.8). La plupart des thèses d'ingénieur-docteur, d'université et de troisième cycle, correspondent cependant à des études techniques plutôt qu'à de véritables travaux scientifiques. Parmi les douze thèses d'État (dont les références sont données dans l'Annexe A), sept portent sur l'hydraulique traditionnelle (chambres et cheminées d'équilibre, déversoirs, surpressions dans les conduites forcées, canaux à surface libre), dont celle de Suzanne Dalmayrac, première femme du laboratoire docteur d'État, en avril 1967. Les cinq autres thèses font apparaître de nouvelles thématiques : la

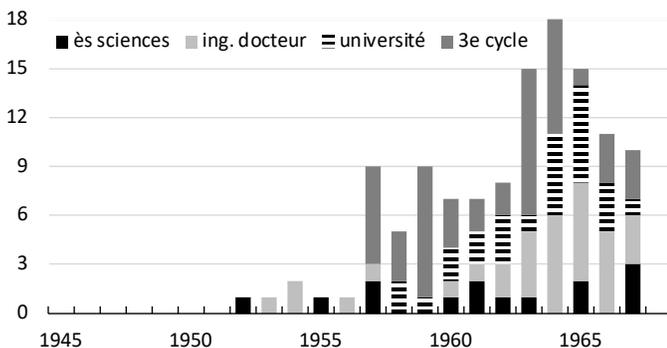


Figure 8.8 Nombre de thèses soutenues au laboratoire d'hydraulique entre 1945 et 1967. Source : *Rapp. UT.*

convection thermique (Christian Truchasson, 1963), les écoulements d'infiltration dans les milieux poreux (Pierre Guével, 1964), la magnéto-hydrodynamique (P. Lecocq, 1964), l'aérodynamique supersonique (Claude Oiknine, 1966), et le déplacement de fluides miscibles (Georges Blanc, 1967).

Certains chercheurs bénéficient d'une bourse du CNRS, tel Pierre Guével, ingénieur IET, ingénieur-docteur en 1953 et docteur d'État en 1964⁶⁵. Guével poursuivra sa carrière à l'École nationale supérieure de mécanique de Nantes (ENSM), dont il dirigera le laboratoire de mécanique des fluides. Parmi les assistants nommés dans la période (dont la plupart ne restent pas), citons Lucien Masbernat et Jean Fabre, docteurs d'État en 1968 et 1970, futurs professeurs à l'ENSEEIH et directeurs de l'IMFT.

Aménagement du site de Banlève sur l'île du Ramier.

Une part croissante des travaux expérimentaux est réalisée sur le site de Banlève, pour l'aménagement duquel Escande obtient d'importantes subventions. Trois nouveaux bâtiments sont ainsi érigés (Figure 8.9) : un bâtiment

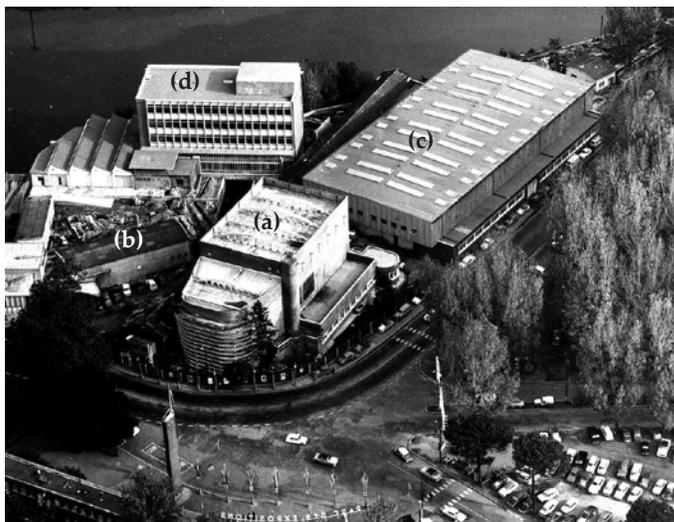


Figure 8.9 L'institut de mécanique des fluides de Toulouse en 1966. (a) bâtiment de couverture de la soufflerie (1942) ; (b) bâtiment des canaux vitrés, (c) hall des maquettes (1959) ; (d) bâtiment de bureaux (1965) (Arch. IMFT).

⁶⁵ P. Guével, *Phénomènes d'infiltration*, thèse d'ingénieur-docteur (nov. 1953) ; thèse de doct. d'État : cf. Annexe A. Publications : Étude du coefficient de perméabilité d'un milieu poreux, *C. R.* **236** 1745 (1953) ; Application de la transformation de Schwarz-Christoffel à l'étude d'un écoulement souterrain, *C. R.* **237** 597 (1953).

dit « des canaux vitrés » (1955), un hall de couverture du « laboratoire plat » qui devient le « hall des maquettes » (1962), et un bâtiment de trois étages de bureaux, bibliothèque et atelier (1965). Ce dernier bâtiment abrite un château d'eau de 59 m³ à 18 mètres de hauteur, pour l'alimentation des modèles réduits.

8.3.3. Destinée de l'institut de mécanique des fluides

Activité de la soufflerie aérodynamique. La soufflerie aérodynamique de l'institut de mécanique des fluides de Toulouse (IMFT), mise en service en 1938, a connu pendant la guerre une activité très importante, liée notamment au repli à Toulouse des services techniques de l'Aéronautique (cf. chap. 6). À la Libération, une partie de ces services techniques demeure à Toulouse où se constitue, à l'est de la ville, un Centre de recherches aérodynamiques de Toulouse (CEAT) géré par le Groupement français pour le développement des recherches aéronautiques (GRA). La direction de ce centre est confiée à Escande, à titre transitoire, jusqu'à la nomination d'un nouveau directeur en avril 1945.

La soufflerie, placée sous la responsabilité d'Albert Claria, voit alors son activité décliner. Escande mentionne encore, en 1945, « une contribution notable à la mise au point d'une série de prototypes particulièrement importants », mais le nombre annuel d'études décroît ensuite fortement comme le montre la Figure 8.10. L'activité connaît un regain à la fin des années 1950, notamment

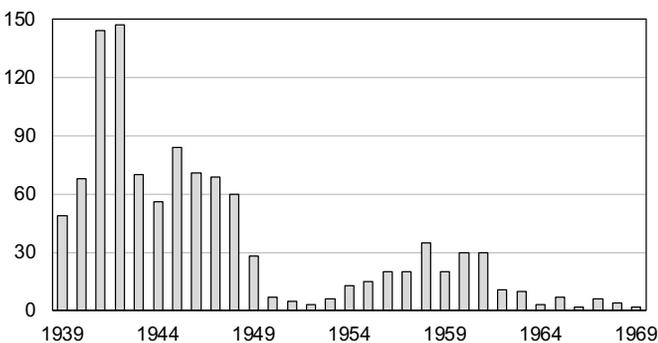


Figure 8.10 Nombre d'essais à la soufflerie aérodynamique (Arch. IMFT et Arch. dép. de la Haute-Garonne).

pour le compte du constructeur Latécoère, puis s'éteint quasiment pendant une décennie⁶⁶. La soufflerie n'aura pas non plus donné lieu, au moins jusqu'aux années 1970, à des recherches plus fondamentales sur l'aérodynamique ou sur la turbulence.

Une destinée évanescence ? L'IMFT créé en 1930 avait drainé des moyens importants, incluant notamment le recrutement de collaborateurs scientifiques, la création d'une maîtrise de conférences transformée en chaire en 1937 (attribuée à Escande), et la construction d'une grande soufflerie aérodynamique. Les « laboratoires d'hydraulique » de l'IET se trouvent alors formellement absorbés dans l'IMFT, conformément au vœu du ministère de l'Air, sans que leur lien historique avec l'IET en soit pour autant effacé. Dans l'avant-propos de l'imposant mémoire que Camichel et Escande publient en 1938 dans les *Publications scientifiques et techniques du ministère de l'Air*, il est ainsi annoncé que le mémoire résume les recherches menées dans « les laboratoires de l'Institut Électrotechnique et de l'Institut de Mécanique des Fluides ». Mais la relation de filiation de ces laboratoires avec l'IET continue de prévaloir, dans les rapports comme dans les discours.

Après la guerre, tandis que l'activité des laboratoires d'hydraulique s'accroît, les références à l'IMFT tendent à disparaître. Dans ses rapports annuels à la faculté des sciences, Escande, au titre de directeur de l'ENSEHT et de l'IMFT, présente les activités scientifiques sous la rubrique du « Laboratoire d'hydraulique », tandis que la rubrique « Institut de mécanique des fluides », distincte, ne rapporte que les statistiques du certificat de mécanique des fluides. À partir de l'année 1953, cette rubrique comprend également une liste des opérations techniques réalisées, au titre du bureau de contrôle et d'essais mécaniques et électriques, dans les différents laboratoires de l'ENSEHT et à la soufflerie aérodynamique. Et à partir de 1958 et au long des années 1960, l'IMFT disparaît tout à fait des rapports, les statistiques relatives aux certificats

⁶⁶ Les rapports d'essais en soufflerie réalisés entre 1937 et 1996, correspondant à quinze mètres linéaires de documents, ont été versés en 2011 aux archives départementales de la Haute-Garonne, sous la cote 7003 W.

se retrouvant alors sous la rubrique du « Service d'hydraulique – Laboratoire d'hydraulique et de mécanique des fluides ».

Une autre circonstance où l'absence de l'IMFT peut surprendre, est la cérémonie solennelle de remise à Escande de son épée d'académicien, en 1954 à Toulouse. Faisant suite aux discours élogieux de ses collègues et amis, la longue réponse d'Escande ne mentionne jamais que « le Laboratoire d'Hydraulique » ; le ministère de l'Air – à qui il doit sa situation dans l'enseignement supérieur – n'apparaît qu'au détour d'une phrase⁶⁷. L'IMFT est également absent des mémoires de thèses qui ne mentionnent jamais que les « laboratoires d'hydraulique de l'ENSEHT ». Dans sa thèse d'université soutenue en 1961, Albert Claria, responsable de la soufflerie, mentionne l'IMFT une fois, dans l'introduction, puis ne parle plus que des « Laboratoires d'Aérodynamique de [l'ENSEEHT] ».

L'association au CNRS. En dépit de l'évanescence de l'IMFT dans la conscience toulousaine, le CNRS y finance, dès le début des années 1950, des personnels de recherche, stagiaires ou attachés de recherche, pour la préparation de thèses⁶⁸. Louis Castex, ingénieur IET et directeur technique des laboratoires de Banlève depuis la fin des années 1930, apparaît en 1955, dans le rapport annuel d'Escande, comme « ingénieur du CNRS au laboratoire de Banlève⁶⁹ ». Lauréat du « prix de laboratoire » de l'Académie des sciences en 1959, il prépare une thèse d'ingénieur-docteur sur « la descente des éléments de batardeaux en eaux vives » (thèse non soutenue). Deux autres de ces personnels contractuels, Fabien Sananès et Jean Piquemal, sont nommés chargés de recherche puis maîtres de recherche – le premier en 1960 et le second peu après. Les autres se réorientent assez rapidement

⁶⁷ Remise de l'Épée d'Académicien à Monsieur L. Escande, 26 mars 1955, Toulouse (Arch. IMFT & Arch. Acad. sc., dossier Escande).

⁶⁸ Rappelons qu'avant la création du CNRS, la Caisse nationale des sciences avait financé, de 1932 à 1936, une bourse de thèse pour Étienne Crausse, cf. chap. 4.

⁶⁹ L. Escande, *Rapp. UT 1954-1955*, p. 154.

vers une carrière dans l'enseignement supérieur (qui leur ouvre grand ses portes) ou partent dans l'industrie⁷⁰.

En 1960, l'équipe dirigeante du « Service hydraulique - Laboratoire d'hydraulique et de mécanique des fluides » comprend ainsi, au côté de deux professeurs (Escande et Nougaro), un maître de recherches au CNRS (Sananès), un maître de conférences (Gerber) et deux chefs de travaux (Alain Barbe et Jean Dat)⁷¹. Plusieurs assistants et chargés de cours contractuels complètent l'équipe pédagogique.

En 1966, le CNRS crée le statut de « laboratoire associé » afin de renforcer ses liens avec les universités. L'institut de mécanique des fluides de Toulouse fait partie des tout premiers à en bénéficier : il est le « LA n° 5 ». Cette consécration signe la réputation de l'hydraulique toulousaine, elle signe aussi l'influence d'Escande dans l'institution – Escande a présidé de 1963 à 1966 la section de mécanique générale et mathématiques appliquées (section 3) du Comité national de la recherche scientifique. En dépit du peu de consistance que possède alors l'IMFT, Escande comprend – comme de nombreux autres directeurs de laboratoire – que la qualité de laboratoire associé représente une opportunité de drainer des moyens supplémentaires pour la recherche⁷².

L'association au CNRS, en 1966, affermit-elle l'existence de l'IMFT au sein de l'université de Toulouse ? Il y faudra du temps. L'année suivant l'association, l'IMFT reste absent du rapport d'Escande. Fabien Sananès, maître de recherches au CNRS, qui en 1960 faisait partie de l'équipe dirigeante du « Service hydraulique - Laboratoire d'hydraulique et de mécanique des fluides », ne semble plus en faire partie⁷³. Un échange de lettres avec le recteur de

⁷⁰ Dans les rapports annuels d'Escande, sont mentionnés stagiaire ou attaché de recherche Pierre Guével (dès 1952), Jean Gruat (1955), Jean Piquemal et Christian Truchasson (1957), Jean Dat, Désiré Le Gourières et Claude Thirriot (1958) ; sont mentionnés chargé de recherche Fabien Sananès (1957) et Jean Gruat (1957) (sources : *Rapp. UT*).

⁷¹ L. Escande, *Rapp. UT 1959-1960*, p. 306.

⁷² Picard (1990, p. 223).

⁷³ L. Escande, *Rapp. UT 1966-1967*, p. 412-446. L'équipe dirigeante du « Service hydraulique - Laboratoire d'hydraulique et de mécanique des fluides » comprend alors Escande, Nougaro et Dat (ce dernier est devenu maître de conférences), ainsi que Thirriot et Gruat, professeurs sans chaire (Sébastien Gerber est décédé en 1963).

l'université, à l'automne 1967, renforce une impression de défaveur⁷⁴. Dans une première lettre, le recteur demande à Escande une régularisation de sa position de directeur de l'IMFT, la nomination ayant été prononcée le 3 mars 1942 pour une période de trois ans, « période arrivée à expiration ». Escande engageant alors la procédure de régularisation auprès du doyen de la faculté, le recteur lui signifie qu'une actualisation préalable du règlement de l'institut est nécessaire, car ce règlement est obsolète depuis 1948 du fait de la disparition du ministère de l'Air. La situation semble d'autant plus étrange que l'IMFT est laboratoire associé au CNRS depuis près de deux ans, et que la convention d'association prévoit la constitution d'un conseil de laboratoire⁷⁵ ! Trois ans plus tard, alors qu'Escande est devenu président du nouvel institut national polytechnique de Toulouse (INPT), son secrétaire général, ancien secrétaire de l'ENSEEIHHT, s'adresse ainsi au recteur de l'Académie :

Je vous rappelle que l'Institut de Mécanique des Fluides doit disparaître en 1971, son rattachement à l'ENSEEIHHT étant prévu pour cette époque. Il constituera l'un des Services de l'École ce qu'il a toujours été. D'ailleurs, l'IMF et l'ENSEEIHHT ont toujours eu une direction et une administration commune, ces deux Établissements fonctionnant dans les mêmes locaux⁷⁶.

Le CNRS n'est mentionné nulle part dans la lettre. Le rattachement annoncé n'aura cependant pas lieu. L'IMFT tendra au contraire, dans les années suivantes, à renforcer son autonomie vis-à-vis de l'ENSEEIHHT, du fait du poids croissant des personnels du CNRS et du contrôle exercé par celui-ci par le biais de ses instances d'évaluation⁷⁷.

⁷⁴ Échanges de lettres entre le recteur, le doyen, et L. Escande, en date du 6 oct., 11 oct. et 22 déc. 1967, et 10 fév. 1968 (Arch. ENSEEIHHT).

⁷⁵ Convention entre l'université de Toulouse et le CNRS, 27 mai 1966 (Arch. ENSEEIHHT).

⁷⁶ Lettre du 23 avril 1970 de G. Bouteille, secrétaire général de l'INPT, à l'Académie de Toulouse (Arch. ENSEEIHHT). G. Bouteille a été nommé Chevalier de la Légion d'honneur en 1964, année où Escande en est lui-même nommé Commandeur (L. Escande, *Rapp. UT 1963-1964*, p. 300).

⁷⁷ Cette autonomie s'affirmera plus encore après sa transformation en 1995 en unité mixte de recherche (UMR 5502) sous la triple tutelle du CNRS, de l'institut national polytechnique de Toulouse (INPT) et de l'université Paul Sabatier (UPS) (Charru (dir.), 2016).

Jean Nougaro (1922-2008)

Jean Nougaro est né le 22 mars 1902 à Toulouse^a. Entré à l'IETMA en 1941, il est envoyé en Allemagne en 1943 au titre du Service du travail obligatoire (STO) et termine ses études après la Libération. Remarqué par Léopold Escande, il est nommé assistant à la faculté des sciences et soutient en 1952 une thèse de doctorat ès sciences sur la propagation des intumescences dans les canaux découverts. Chef de travaux (1952) puis maître de conférences (1955) et professeur sans chaire (1958), il est nommé en 1960 titulaire d'une nouvelle chaire d'hydraulique à l'ENSEEHT. Il assiste dès lors Escande dans l'essor de l'école et des laboratoires d'hydraulique. Il poursuit par ailleurs des études sur les écoulements transitoires, sur le fonctionnement et la sécurité des ouvrages, et sur le calcul par analogie électrique.



À la création, en 1970, de l'institut national polytechnique de Toulouse (INPT), Nougaro prend la direction de l'ENSEEHT et de l'IMFT. Il conduit la mise en place de nouveaux enseignements de troisième cycle et réorganise l'IMFT autour de nouvelles thématiques de recherche. En 1980, il est élu à la présidence de l'INPT où il s'attache en particulier au développement des relations internationales. En 1986, il retrouve son activité de professeur à l'ENSEEHT. Il occupe alors diverses responsabilités dans des associations régionales liées à l'hydraulique et à l'hydrologie, au Conseil économique et social de la région Midi-Pyrénées, et comme expert à la Cour d'appel de Toulouse.

Jean Nougaro a été distingué Docteur *honoris causa* de l'université polonaise de Wrocław et membre d'honneur de l'Académie d'hydrologie de Hongrie.

^a. Bories (2008) ; *Rapp. UT*.

8.4. Les laboratoires d'électrotechnique

L'électrotechnique, très présente dès l'origine de l'institut dans les enseignements et dans l'activité du bureau de contrôle et d'essais, n'a cependant pas fait l'objet de recherches scientifiques spécifiques jusqu'à la fin des années 1940. L'électricité intervenait néanmoins, de plus en plus fréquemment, dans l'instrumentation du laboratoire d'hydraulique, notamment lorsqu'on voulait transformer un signal mécanique en signal électrique.

C'est ainsi que Pierre Dupin a mis au point en 1929 une sonde de mesure de vitesse, fondée sur la variation de capacité ou d'inductance d'un circuit mettant en jeu des oscillateurs à lampes⁷⁸. Dupin a par ailleurs développé la vélocimétrie par fil chaud, qui fait intervenir des ponts de Wheatstone. Baubiac a conçu pour sa thèse un dynamomètre fondé sur la mesure de très petits déplacements, par variation de capacité d'un condensateur, lui donnant accès à la force exercée par un écoulement sur un obstacle (Figure 8.11)⁷⁹.

L'électrotechnique et l'électronique deviennent de véritables thématiques de recherche après la guerre, lorsque Teissié-Solier et Dupin, devenus maîtres de conférences après la transformation de la chaire de Camichel, s'engagent dans la création de leurs propres laboratoires.

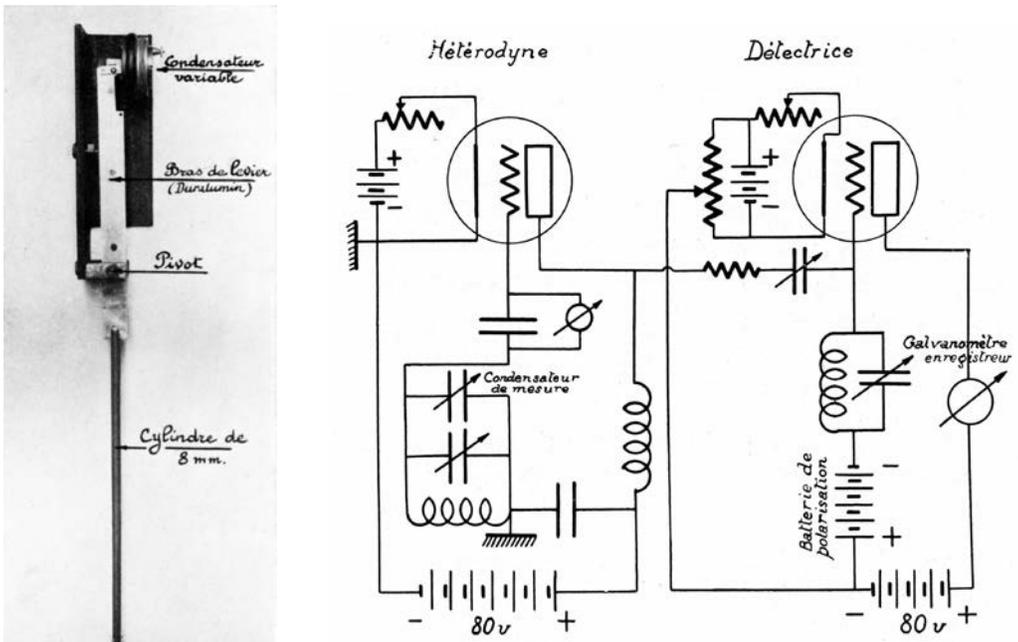


Figure 8.11 Dispositif de mesure de la force exercée sur un cylindre placé dans un écoulement, par renvoi de la flexion du cylindre sur les armatures d'un condensateur, et circuit électronique associé ; on y remarquera en particulier les deux triodes (Baubiac, 1936).

⁷⁸ Dupin (1929).

⁷⁹ Crausse & Baubiac (1931a).

8.4.1. Le laboratoire d'électrotechnique et d'électricité industrielle

Des recherches dans le domaine de l'électrotechnique sont mentionnées pour la première fois en 1946 dans le rapport d'Escande au Conseil de l'université, sous une rubrique intitulée « Liste des publications du laboratoire d'électrotechnique »⁸⁰.

Deux publications y sont indiquées, dont la première est un rapport relatif à une étude « Sur la courbe de courant de dynamos à courant continu » réalisée par Teissié-Solier en collaboration avec R. Paindavoine ; la seconde publication est plutôt une thèse en préparation, par un ingénieur IET, Joseph Mauret.

L'année suivante, l'activité du « Laboratoire d'électricité industrielle » porte sur le fonctionnement des transformateurs et sur « divers phénomènes transitoires qui accompagnent le fonctionnement des machines électriques⁸¹ ». Trois thèses d'université sont alors soutenues :

- sur les oscillations de fonctionnement des machines synchrones (Joseph Mauret) ;
- sur la mesure des pertes à vide dans les transformateurs (Abdul Azim Ziai, juill. 1947) ;
- sur un transformateur fonctionnant sur des capacités (Mohamed Haidar Faiji, juill. 1947).

Deux autres thèses d'université sont soutenues l'année suivante :

- sur les oscillations d'un moteur compound à courant continu (Pierre Lalangue, mars 1948), objet du premier *Compte rendu de l'Académie des sciences* (C. R. **226**, 1893) ;
- contribution à l'étude des cycles d'hystérésis magnétique (E. Dumont, nov. 1948)⁸².

⁸⁰ L. Escande, *Rapp. UT* 1945-1946, p. 107.

⁸¹ L. Escande, *Rapp. UT* 1946-1947, p. 98-99.

⁸² Il s'agit là du titre donné par Escande ; celui donné par le doyen, dans le même rapport, est « Régulation de la vitesse des moteurs par les procédés à lampes ».

L'activité du laboratoire se développe : sept ingénieurs IET y préparent une thèse au cours de l'année 1948-1949⁸³ :

- Roger Lay, sur le fonctionnement des machines asynchrones associées à une batterie de condensateurs (doctorat d'université soutenu en octobre 1950) ;
- R. Monier, sur le couplage en tandem des moteurs asynchrones (thèse semble-t-il abandonnée) ;
- Jacques Yviquel, sur les moteurs asynchrones à cages multiples (doct. univ., oct. 1950) ;
- Jean Cotte, sur les jauges à fil résistant et leurs applications (doct. univ., oct. 1950) ;
- Robert Lacoste, sur le réglage de la vitesse des moteurs asynchrones (ing.-doct., nov. 1951) ;
- Roger André, sur les conditions de démarrage et du fonctionnement normal des moteurs d'induction (ing. doct., déc. 1951) ;
- Jean Lagasse, sur la détermination des coefficients de self-induction de fuites et les phénomènes de résonance (doct. ès sciences, mai 1952).

Dans les années suivantes, les études portent sur les courants alternatifs déformés par la présence d'harmoniques, sur le comptage industriel d'énergie et de puissance, sur un dispositif de variation de la vitesse des moteurs asynchrones d'induction (dispositif « Métacin »), et sur les électro-aimants destinés à des installations de télécommande (pour le compte de l'Électricité de France). Sont également mentionnées l'étude mécanique et électrique de vernis isolants, et la détermination, par une méthode électrique, de la profondeur de couches de terrain (pour les Ponts et Chaussées). Teissié-Solier s'est adjoint un brillant ingénieur de l'IET, Jean Lagasse, auteur de la première thèse de doctorat ès sciences du laboratoire. Recruté comme assistant, Lagasse est nommé chef des travaux en 1950, soutient sa thèse en 1952, et obtient une maîtrise de conférences d'électrotechnique en 1955.

La dénomination du laboratoire se stabilise en 1955 sur « laboratoire d'électrotechnique et d'électricité industrielle » (LEEI). Son équipe dirigeante est alors composée

⁸³ L. Escande, *Rapp. UT 1948-1949*, p. 87-89.

de M. Teissié-Solier (professeur), J. Lagasse (maître de conférences), R. Lacoste (chef de travaux), et C. Curie (chargé de cours d'électronique industrielle).

Les travaux de Teissié-Solier et de Lagasse font l'objet de rapports distincts à partir de 1957⁸⁴. Cette année-là au « LEEI I », Teissié-Solier poursuit ses travaux sur la régulation de vitesse des moteurs asynchrones, tandis que son associé C. Curie travaille sur la télévision et les amplificateurs. Quatre thèses sont alors en préparation, dont deux thèses d'État (Y. Sévely et Y. Surchamp) et deux thèses d'ingénieur-docteur. Quatre publications sont indiquées : la thèse d'ingénieur-docteur de Y. Lasserre, deux *Comptes rendus à l'Académie des sciences*, et une demande de dépôt de brevet. La même année au « LEEI II », Lagasse s'oriente vers l'étude des servomécanismes et des asservissements, tandis que son associé Lacoste, chef de travaux, s'intéresse aux applications des hautes tensions – notamment aux « canons à électrons » pour la microscopie et pour les écrans cathodiques. Sept thèses sont en préparation : trois d'État (R. Lacoste, R. Mézencev, et G. Giralt) et quatre d'ingénieur-docteur. Six publications sont indiquées : une pour la *Revue Générale d'Électricité*, quatre *Comptes rendus* et un brevet déposé.

En 1961, le laboratoire de Lagasse s'émancipe complètement de celui de Teissié-Solier, pour se constituer en nouveau laboratoire (cf. ci-après). Les recherches au LEEI (ex-LEEI I) se poursuivront sur les problèmes d'équilibrage des réseaux, sur les dispositifs de réglage de vitesse des moteurs asynchrones, sur les dispositifs à thyristors d'alimentation, sur la structure des machines à commutation statique, et sur la métrologie en très basse fréquence. En 1967, le LEEI est structuré autour de quatre personnes dont un chercheur CNRS : M. Teissié-Solier, Max Marty (chargé d'enseignement), Y. Surchamp (maître de recherches au CNRS) et C. Curie (chargé d'enseignement)⁸⁵.

⁸⁴ *Rapp. UT 1956-1957*, p. 172-187.

⁸⁵ En 2007, le LEEI fusionnera avec le Laboratoire de génie électrique de Toulouse (LGET) et le Centre de physique des plasmas et de leurs applications de Toulouse (CPAT) pour former le Laboratoire plasmas et conversion d'énergie (LAPLACE). Max Marty sera président de l'Institut National Polytechnique de Toulouse de 1986 à 1991.

8.4.2. Un nouveau laboratoire de génie électrique

La rupture de Lagasse avec le LEEI, amorcée en 1955 avec l'apparition de deux équipes et de rapports d'activité séparés, est consommée en 1961 lorsque Lagasse crée le « laboratoire de génie électrique » (LGE) – premier laboratoire français à prendre cette dénomination.

Il s'appelait Teissié-Solier, commentera plus tard Lagasse, il était professeur d'électrotechnique et moi je lui parlais de servomécanismes, et j'avais l'impression que je lui parlais hébreu⁸⁶.

Le personnel d'encadrement du nouveau LGE comprend alors J. Lagasse (professeur), R. Lacoste (maître de conférences), Y. Sévely (maître assistant), et deux assistants. Les recherches portent sur les hautes tensions, sur les isolants et les diélectriques, et sur l'automatique et l'électronique industrielle. Une thèse d'État a été soutenue dans l'année (C. Mira) ainsi que onze thèses de troisième cycle ; six thèses d'État sont en préparation⁸⁷.

La Figure 8.12 montre l'évolution, jusqu'en 1967, du nombre de thèses soutenues au LEEI et au LGE, par type de thèse. Le phénomène le plus remarquable est le net accroissement, à la fin des années 1950, du nombre de thèses soutenues. Ce phénomène, qui touche également le laboratoire l'hydraulique comme on l'a noté, est lié d'une part à la création des centres de troisième cycle, et d'autre part aux moyens considérables que la nouvelle Cinquième République consacre à la recherche scientifique, par le biais, en particulier, de la DGRST (cf. section précédente). Le LGE, animé par son ardent responsable, bénéficie pleinement de cette dynamique : en dix ans, y sont soutenues 16 thèses d'État, 9 thèses d'ingénieur-docteur, 11 thèses d'université, et 57 thèses de troisième cycle.

⁸⁶ Entretien de P.-É. Mounier-Kuhn et J.-F. Picard avec Jean Lagasse, 18 nov. 1986, cité par Mounier-Kuhn (2010, p. 268).

⁸⁷ L. Escande, *Rapp. UT 1960-1961*, p. 280-296.

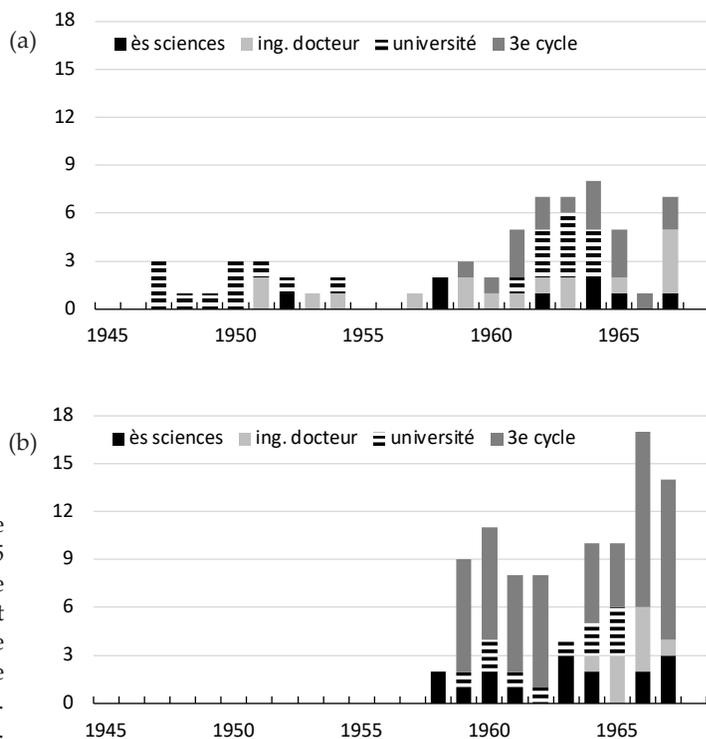


Figure 8.12 Nombre de thèses soutenues entre 1945 et 1968, (a) au laboratoire d'électrotechnique et d'électricité industrielle (LEEI) ; (b) au laboratoire de génie électrique (LGE).
Source : *Rapp. UT.*

En 1967, au seuil d'une nouvelle rupture, le LGE est structuré en trois groupes de recherche – composants-fiabilité, traitement du signal, et théorie et simulation – localisés à l'ENSEEHT et à l'INSA. Il comprend également un service de mesure et instrumentation répondant au souci de rapprocher recherche fondamentale et industrie :

Ce service, explique Lagasse, constitué pour l'essentiel d'ingénieurs et de techniciens, a pour rôle d'assurer le passage d'une idée issue de la recherche fondamentale dans le domaine de l'application jusqu'à la phase de pré-développement. Il fournit également l'assistance technique permanente apportée aux sociétés fabriquant sous licence CNRS du matériel résultant des brevets d'invention émanant du laboratoire⁸⁸.

⁸⁸ L. Escande, *Rapp. UT 1966-1967*, p. 424.

L'activité y est importante : quatorze thèses ont été soutenues dans l'année, dont trois de doctorat d'État (Jean-Claude Martin, Bernard André, Darcy Domingues Novo), une de docteur-ingénieur, et dix de troisième cycle (la liste complète des thèses d'État est donnée dans l'Annexe A).

Jean Lagasse (1924-2003)

Né à Carcassonne le 11 septembre 1924, ingénieur IET (1946), Jean Lagasse débute sa carrière universitaire comme ingénieur préparateur à l'IET^a. Nommé chef de travaux en 1949 puis maître de conférences l'année suivante, il soutient en 1952 une thèse de docteur ès sciences préparée au laboratoire d'électrotechnique. Il quitte ce dernier en 1956 et crée le laboratoire de génie électrique (LGE). Professeur sans chaire en 1958, il est nommé professeur titulaire de la chaire d'électronique en 1960.

Lagasse quitte l'ENSEEHT en 1967, entraînant avec lui la majeure partie du LGE, pour créer le laboratoire d'automatique et de ses applications spatiales (LAAS), laboratoire propre du CNRS établi sur le nouveau complexe scientifique de Rangueil. Il est cette année-là distingué Docteur *honoris causa* de l'université de Pernambuco (Brésil).

En nov. 1975, Lagasse est détaché au CNRS comme directeur scientifique, où il crée la Section des sciences pour l'ingénieur (SPI) (« section » bientôt renommée « département »), qu'il dirige de 1975 à 1979^b. Ardent prosélyte du développement des relations entre recherche académique et industrie, il y met en place de grands programmes de recherche sur l'énergie, la robotique, la microélectronique, et l'informatique. Il anime également, à la DGRST, le Comité d'action concertée Automatisation et grands systèmes, associant industrie et recherche. Il cofonde le Club des enseignants en électrotechnique, électronique et automatique (EEA).

En juin 1979, il prend la direction des affaires scientifiques et techniques (directeur scientifique) de la Régie nationale des usines Renault. Il est dans les années suivantes membre des conseils scientifiques du CNRS (1981-1989) et de l'Institut de recherche des transports IRT (1982-1987), et membre de plusieurs autres comités et conseil d'administration. Il préside notamment le Comité d'évaluation et de prospective des transports terrestres du ministère de l'Industrie et de la Recherche (1984-1988), ainsi que la Société franco-japonaise des techniques industrielles (1988-1989).

Scientifique créatif et visionnaire, homme d'action à l'enthousiasme communicatif, meneur d'équipe exceptionnel, Jean Lagasse décède le 24 avril 2003.



a. Numéro spécial de la Lettre du LAAS, juill. 2003 ; rapp. UT ; dossier administratif.

b. Ramunni (1995a) ; Guthleben (2013, chap. 9).

Fondation du LAAS. Jean Lagasse, soutenu par le CNRS avec lequel il a noué des relations étroites, s'émancipe de l'ENSEEHT en 1967 pour fonder le Laboratoire d'automatique et de ses applications spatiales (LAAS). Laboratoire propre du CNRS, le LAAS s'installe sur le nouveau complexe scientifique de Rangueil.

Ce laboratoire dont le gros œuvre est pratiquement terminé au 1^{er} juillet 1967, déclare alors Lagasse, recevra la plupart des cadres scientifiques et techniques de l'actuel Laboratoire de Génie Électrique lors de sa mise en fonctionnement au début de l'année 1968⁸⁹.

Ces cadres scientifiques sont, outre Lagasse, Georges Giralt (maître de recherches au CNRS), et Robert Lacoste et Yves Sévely (respectivement professeur et professeur sans chaire à la faculté des sciences).

Le LAAS connaît dès lors une expansion rapide. En 1979, il sera devenu, avec ses cent chercheurs effectifs, le « navire amiral » du département des sciences physiques pour l'ingénieur du CNRS⁹⁰.

8.5. Les laboratoires d'électronique

La télégraphie sans fil a fait son entrée à l'IET en 1927 dans les enseignements de Dupin et une section d'ingénieur radioélectricien a été créée en 1935. Une thèse d'université a été soutenue en 1937 sur les communications hertziennes par ondes courtes (cf. chap. 4). Des transmissions entre l'IET et l'observatoire du pic du Midi, relatives à la météorologie, ont été réalisées en 1938 et 1939 « sur une des ondes de la gamme des 40 mètres attribuées au ministère de l'Air et sur des ondes de 5 mètres et au-dessous en vue d'essais et de recherches⁹¹ ». À ces recherches sont associés Roger Favre-Artigues et Henri Camichel, physicien-adjoint à l'observatoire et neveu de Charles.

⁸⁹ L. Escande, *Rapp. UT* 1966-1967, p. 424.

⁹⁰ Ramunni (1995a, p. 89).

⁹¹ Lettres de Camichel à Jules Baillaud, 23 déc. 1938 et 7 et 13 nov. 1939 ; lettre du général Jullien à Camichel, 22 déc. 1939 (Arch. IMFT).

8.5.1. Le laboratoire de radioélectricité

La radioélectricité prend un nouvel élan en 1948 lorsque la maîtrise de conférences de Dupin est transformée, comme celle de Teissié-Solier, en chaire de professeur. Dupin, sous-directeur de l'ENSEHT, crée alors un laboratoire de radioélectricité⁹². Deux thèses sont soutenues cette année-là :

- sur l'oscillateur électronique Pierce à quartz (Jean-Raoul Coulon, doct. ing.-doct., mars 1948) ;
- sur les cellules photoélectriques à vide et l'action sur celles-ci d'un champ magnétique (Raymond Birebent, doct. ès sciences, juill. 1948).

Ces travaux, comme ceux de Teissié-Solier, font l'objet de publications dans les *Comptes rendus de l'Académie des sciences* et dans la *Revue générale de l'électricité*. Deux autres thèses sont alors en préparation, sur la stabilisation des hautes tensions continues obtenues à l'aide de redresseurs (Jean Serny, ing.-doct., janv. 1950), et sur les régulateurs à lampe (M. Curie, thèse semble-t-il abandonnée par la suite). Diverses études sont également en cours pour l'industrie, en particulier sur l'électrification des papiers et sur la mesure d'épaisseur de gomme des papiers à cigarette.

En 1952, le laboratoire de radioélectricité est renommé laboratoire d'électronique et haute fréquence (LEHF). Au cours des six années suivantes, deux thèses y sont soutenues : une thèse d'État sur les oscillateurs à quartz (Jean-Raoul Coulon) et une thèse d'ingénieur-docteur. L'activité augmente par la suite : de 1959 à 1967, sont soutenues six thèses d'État (cf. Annexe A), six thèses d'université, trois thèses d'ingénieur-docteur, et vingt-huit thèses de troisième cycle (Figure 8.13a). En 1967, le laboratoire compte, en plus de Dupin, un maître de conférences (J.-C. Hoffmann), deux maîtres-assistants (J. Bajon et P. Jossierand), et deux chargés de recherche au CNRS (Serge Lefeuvre et J.-C. Matheau).

⁹² L. Escande, *Rapp. UT 1948-1949*.

8.5.2. Le laboratoire de semiconducteurs

Raymond Birebent, assistant de Dupin depuis 1941, chef des travaux à partir de 1950, est nommé en 1957 maître de conférences d'électronique appliquée. Deux ans plus tard, il quitte le laboratoire de Dupin pour fonder son propre « laboratoire d'électronique appliquée et de semiconducteurs » bientôt renommé plus brièvement « laboratoire de semiconducteurs ». Birebent, nommé professeur sans chaire l'année suivante, est assisté par R. Morelière, chef de travaux d'électronique puis maître-assistant (1963). De 1959 à 1967, trente-six thèses de troisième cycle sont soutenues au laboratoire, nombre important lié à l'attraction que l'électronique exerce sur les étudiants (Figure 8.13b). Ces travaux ne débouchent en revanche sur aucune thèse d'État, sur seulement deux thèses d'ingénieur-docteur, et l'activité de publication reste faible.

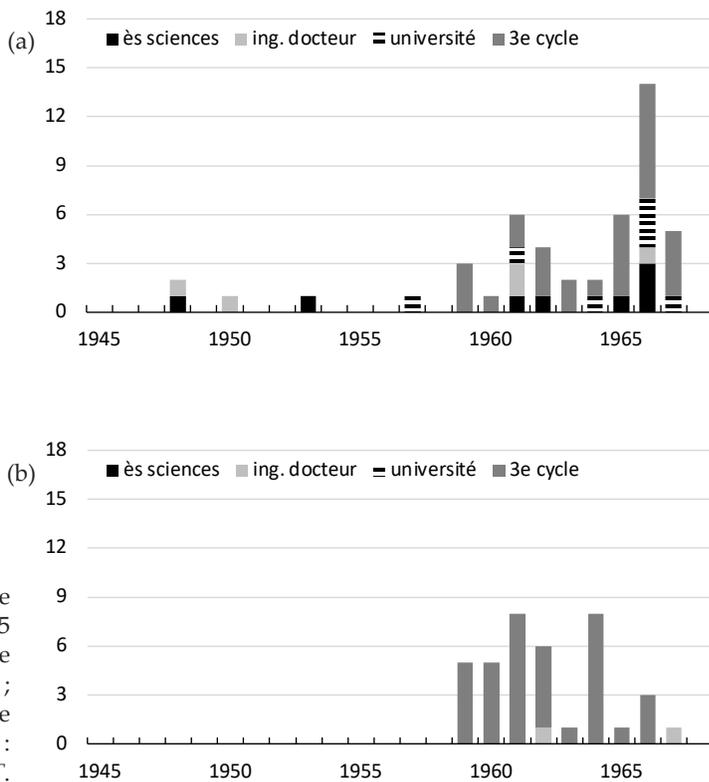


Figure 8.13 Nombre de thèses soutenues entre 1945 et 1968, (a) au laboratoire d'électronique (LEHF) ; (b) au laboratoire de semiconducteurs. Source : *Rapp. UT.*

8.6. Épilogue

Suite aux événements sociaux-politiques de mai 1968, un vaste mouvement de réforme de l'enseignement supérieur est engagé. Le projet initial prévoit notamment que les écoles d'ingénieurs feraient partie d'universités pluridisciplinaires, avec obligation pour ces écoles d'accueillir sans sélection tous les bacheliers – c'est-à-dire sans concours d'entrée⁹³. Ce projet reprend ainsi des propositions du plan Langevin-Wallon du lendemain de la guerre, que les gouvernements de la IV^e République n'avaient pas su concrétiser.

Ce projet échouera une nouvelle fois, victime de groupes de pression – essentiellement les directeurs d'écoles et les associations d'anciens élèves – qui, au nom de la préservation d'une qualité des recrutements jugée menacée, auront obtenu les appuis politiques nécessaires. La loi d'orientation de l'enseignement supérieur votée en 1969, dite loi Edgar Faure, qui substitue aux anciennes facultés des unités d'enseignement et de recherche (UER), confère ainsi aux écoles un statut d'UER dérogatoire leur accordant une indépendance administrative accrue. Ce statut prévoit en particulier que les dotations d'équipement, crédits de fonctionnement et créations d'emplois seront attribués aux écoles directement par le ministère, et que les directeurs de ces écoles seront ordonnateurs de leur budget⁹⁴. Les ENSI échappent donc, *de facto*, au contrôle des universités et le clivage entre formations scientifiques généralistes et formations d'ingénieurs s'en trouve renforcé. Les nouveaux instituts universitaires de technologie, destinés à la formation en deux ans de techniciens supérieurs, obtiennent le même statut d'UER dérogatoire.

De surcroît, les facultés des sciences de Grenoble, Nancy et Toulouse, qui comprennent chacune plusieurs ENSI, obtiennent de quitter leur université de tutelle pour se fédérer en établissements autonomes, ayant rang d'université, qui prennent le nom d'instituts nationaux polytechniques (INP). C'est ainsi qu'est créé, par décret du 23 décembre 1970, l'INP de Toulouse qui regroupe

⁹³ Grossetti (1995, p. 39-40) ; Birck (2006a, p. 74).

⁹⁴ Lettre du ministère de l'Éducation nationale au directeur de l'ENSEEHT, 3 oct. 1969 (Arch. ENSEEHT).

l'ENSEEIH, l'École de chimie (ENSCT), l'Institut du génie chimique (IGC), et l'École d'agriculture (ENSAT). Son premier président est Léopold Escande. La direction de l'ENSEEIH ainsi que celle de l'IMFT reviennent alors à Jean Nougaro⁹⁵.

La création de l'INP de Toulouse, qui confirme une partition en germe dès la création des ENSI en 1948, signe donc l'abandon du projet de Sabatier et Camichel, quelque soixante-dix ans auparavant, de lier formations scientifiques généralistes et formations d'ingénieurs dans une même structure universitaire. Mais quatre décennies plus tard, cette idée resurgit : encouragée dès les années 2010 par le ministère de l'Éducation nationale par le biais d'une labellisation de l'« excellence », une grande université de Toulouse fédérant facultés et écoles est, en 2024, en cours de reconstitution.

Notons pour conclure que l'institut électrotechnique de Toulouse, fruit d'une ambition et d'une persévérance tant universitaire que municipale, et soutenu par un acteur industriel entreprenant – la Compagnie des chemins de fer du Midi –, n'a sans doute pas eu l'effet escompté sur le développement industriel de la région. Cet institut apparaît néanmoins, un siècle après sa création, comme une pièce majeure de l'histoire universitaire toulousaine et la matrice à partir de laquelle ont bourgeonné de nombreux laboratoires et départements d'enseignement. Les équipes de recherche issues de la chaire d'électrotechnique de Camichel rassemblent ainsi aujourd'hui plus de 60 % des chercheurs toulousains en ingénierie, auxquels s'ajoutent quelques 20 % correspondant aux équipes d'informatique dont l'existence doit beaucoup à l'ENSEEIH⁹⁶.

⁹⁵ Nougaro est assisté par Jean Piquemal, Jean Dat et Jean Gruat, puis par Serge Bories nommé directeur-adjoint.

⁹⁶ Grossetti & Mounier-Kuhn (1995).

ANNEXES

Annexe A

Thèses soutenues à l'IET-ENSEHT de 1907 à 1967

A.1. Thèses soutenues entre 1907 et 1947

1. Denis EYDOUX, 1919 *Les mouvements de l'eau et les coups de bélier dans les cheminées d'équilibre*. Thèse de doctorat ès sciences phys. de la faculté des sciences de Toulouse.
2. Adrien FOCH, 1920 *Contribution à l'étude des coups de bélier dans les conduites munies d'un réservoir d'air*. Thèse de doctorat ès sciences phys. de la faculté des sciences de l'univ. de Paris.
3. Léopold ESCANDE, 1929 *Étude théorique et expérimentale sur la similitude des fluides incompressibles pesants*. Thèse de doctorat ès sciences phys. de l'univ. de Toulouse.
4. Charles LEDOUX, 1929 *Contribution à l'étude théorique et expérimentale de l'écoulement par déversoir*. Thèse de doctorat ès sciences de l'univ. de Toulouse.
5. Pierre DUPIN, 1930 *Étude expérimentale sur les tourbillons alternés de Bénard-Kármán*. Thèse de doctorat ès sciences phys. de l'univ. de Paris.
6. Charles BOUJON, 1931 *Expériences sur l'écoulement en déversoir. Étude du déversoir d'Herschel et des déversoirs à talus et à crête arrondie*. Thèse de doctorat ès sciences de l'univ. de Toulouse.
7. Max TEISSIÉ-SOLIER, 1931 *Contribution à l'étude des corps immergés*. Thèse de doctorat ès sciences phys. de l'univ. de Toulouse.
8. Jean BAUBIAC, 1936 *Étude expérimentale, en régime transitoire, du sillage et de la résistance des corps immergés*. Thèse d'ingénieur-docteur de l'univ. de Toulouse. PST n° 98.
9. Étienne CRAUSSE, 1936 *Contribution à l'étude expérimentale de phénomènes transitoires et de phénomènes périodiques se produisant dans les liquides en mouvement*. Thèse de doctorat ès sciences phys. de l'univ. de Toulouse. PST n° 95.
10. Luis CASTAGNETTO, 1939 *Contribution à l'étude des tourbillons alternés de Bénard-Kármán*. Thèse d'ingénieur-docteur de l'univ. de Toulouse (doct. ès sciences 1948).

A.2. Thèses de doctorat d'État soutenues entre 1947 et septembre 1967

A.2.1. Laboratoire d'hydraulique et de mécanique des fluides

1. Jean NOUGARO, Étude théorique et expérimentale de la propagation des intumescences dans les canaux découverts, mai 1952.
2. Sébastien GERBER, Étude théorique et expérimentale de la stabilité des chambres d'équilibre situées en aval d'une galerie en charge alimentée par un canal à écoulement libre, nov. 1954.
3. Jean GRUAT, Étude par analogie électrique des oscillations du plan d'eau dans les cheminées d'équilibre, mars 1957.
4. Fabien SANANÈS, Étude des seuils déversants munis d'une fente aspiratrice, mars 1957.
5. Jean PIQUEMAL, Détermination par analogie électrique des phénomènes de surpression dans les conduites forcées, déc. 1959.
6. Jean DAT, Contribution à l'étude des cheminées d'équilibre déversantes, juin 1961.
7. Claude THIRRIOT, Contribution à l'étude des régimes variés et des régimes transitoires dans les canaux d'usines, déc. 1960.
8. Désiré LE GOURIÈRES, Étude d'un compresseur d'air hydraulique. Méthodes graphiques pour le calcul des coups de bélier sur les installations munies de réservoirs d'air, avr. 1962.
9. Christian TRUCHASSON, Contribution à l'étude de la convection forcée en régime turbulent pour des nombres de Prandtl supérieurs à un, juin 1963.
10. P. LECOCQ, Contribution à l'étude des pertes de charge et profils de vitesse en écoulement turbulent magnéto-hydrodynamique, oct. 1964.
11. Pierre GUÉVEL, Contribution à l'étude théorique des écoulements d'infiltration, oct. 1964.
12. Claude OIKNINE, Contribution à l'étude de l'élargissement d'une veine, oct. 1966.
13. Suzanne DALMAYRAC, Contribution à l'étude des écoulements dans des canaux à section rectangulaire dont la largeur varie linéairement, avr. 1967.
14. Georges BLANC, Contribution à l'étude des déplacements par fluides miscibles, avr. 1967.

A.2.2. Laboratoire d'électrotechnique et d'électricité industrielle

1. Jean LAGASSE, Les inductances de fuite et les phénomènes de résonance, mai 1952.
2. Yves SÉVELY, Développement de la méthode de résonance et son application à l'étude des machines à courant alternatif, 1958.

3. Y. SURCHAMP, Étude d'un dispositif de réglage de la vitesse d'un moteur asynchrone d'induction monophasé et de son application à la traction, 1958.
4. Pierre LALANGUE, Contribution à l'étude des machines asynchrones dissymétriques, déc. 1961.
5. PHAM Van Vui, Les inductances et les phénomènes de commutation cyclique, oct. 1963.
6. Bernard TRANNOY, Contribution à l'étude des phénomènes statiques d'équilibrage des réseaux polyphasés, juin 1964.
7. Max MARTY, Contribution à l'étude de l'échauffement des machines tournantes électriques, avr. 1965.
8. DANG Phuoc Ly, Contribution à l'étude des multiplicateurs à effet Hall et de ses applications, oct. 1966.

A.2.3. Laboratoire de génie électrique

1. Georges GIRALT, Mesure de valeurs de crête en haute tension, mai 1958.
2. Romane MÉZENECV, Réalisation d'un générateur d'ondes de choc à haute tension, à contrôle électronique, juill. 1958.
3. Robert LACOSTE, Contribution à l'étude de la conductibilité des isolants solides, oct. 1959.
4. Étienne CASSIGNOL, Contribution à l'étude d'alimentations stabilisées à transistors à performances élevées, fév. 1960.
5. Igor GUMOWSKI, Sur un effet non linéaire dans les amplificateurs à transistors avec réaction, juin 1960.
6. Christian MIRA, Contribution à l'étude des circuits d'un codeur électronique, mars 1961.
7. J.-C. RAOULT, Étude de l'opérateur humain en tant qu'élément d'un système asservi, déc. 1962.
8. PHAM Huu Hiep, Étude des thyatronns en régime de commutation, mai 1963.
9. C. DURANTE, Contribution à l'étude des circuits stato-magnétiques en régime de commutation, juin 1963.
10. H. MARTINOT, Contribution à l'étude du comportement des diélectriques solides aux très basses fréquences ($10^{-4} - 10^{-1}$ Hz), oct. 1963.
11. P. VIDAL, Contribution à l'étude des circuits de régulation comportant des redresseurs contrôlés (1^{er} sujet) - L'environnement spatial et ses effets sur les composants et matériaux (2^e sujet), févr. 1964.
12. G. GRATELOUP, Sur l'identification de la dynamique des processus en automatique, déc. 1965.
13. NUI-AI, Contribution à l'étude de la dégradation des isolants en feuilles sous l'action de décharges partielles, avr. 1966.

14. Jean-Claude MARTIN, Contribution à l'étude de l'amplification des faibles signaux électriques, oct. 1966.
15. Bernard ANDRÉ, Contribution à l'étude de la densité électronique de faisceaux d'électrons, nov. 1966.
16. Darcy Domingues Novo, Contribution à l'étude du phénomène de la deuxième disrution dans les transistors, déc. 1966.

A.2.4. Laboratoire d'électronique et haute-fréquence

1. Raymond BIREBENT, Recherches sur l'action d'un champ magnétique uniforme sur des cellules photo-électriques à vides, juill. 1948.
2. Jean-Raoul COULON, Contribution à l'étude de la courbe de résonance d'un quartz, 1953.
3. Serge LEFEUVRE, Contribution à l'étude des filtres dissipatifs en hyperfréquence, oct. 1961.
4. J.-C. HOFFMANN, Contribution à l'étude des circuits résonnants utilisant des capacités non linéaires, avr. 1962.
5. P. FRANDON, Contribution à l'étude des capacités non linéaires apparentes d'un varactor, juin 1965.
6. A. MARRECKCHI, Contribution à l'étude du comportement des jonctions PN en régime de forts niveaux, juin 1966.
7. H. BAUDRAND, Étude des propriétés intrinsèques des mélangeurs de fréquence micro-ondes, juin 1966.
8. J.-C. MATHEAU, Contribution à l'étude des lignes de transmission non uniformes, juin 1966.

A.2.5. Laboratoire de semiconducteurs

Pas de thèse de doctorat d'État soutenue sur la période.

Annexe B

Convention de création de l'institut électrotechnique de Toulouse (1907)

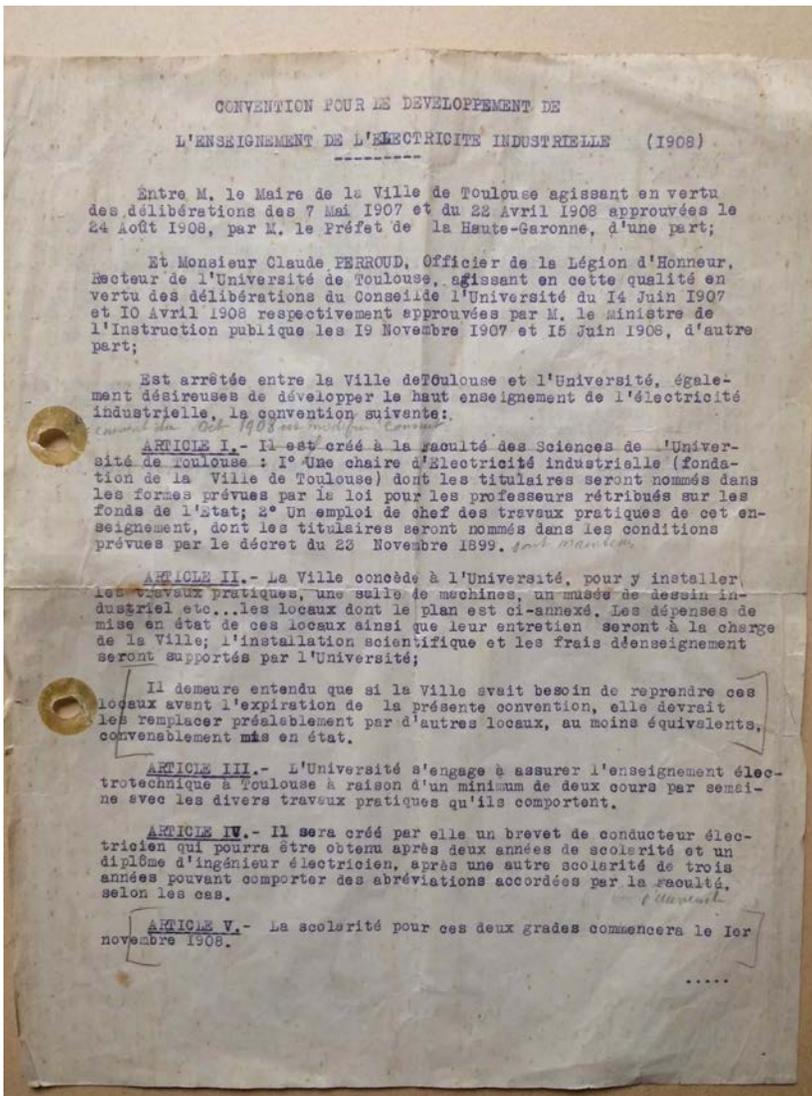


Figure B.1
Convention de création de l'IET de Toulouse, page 1 (1908).

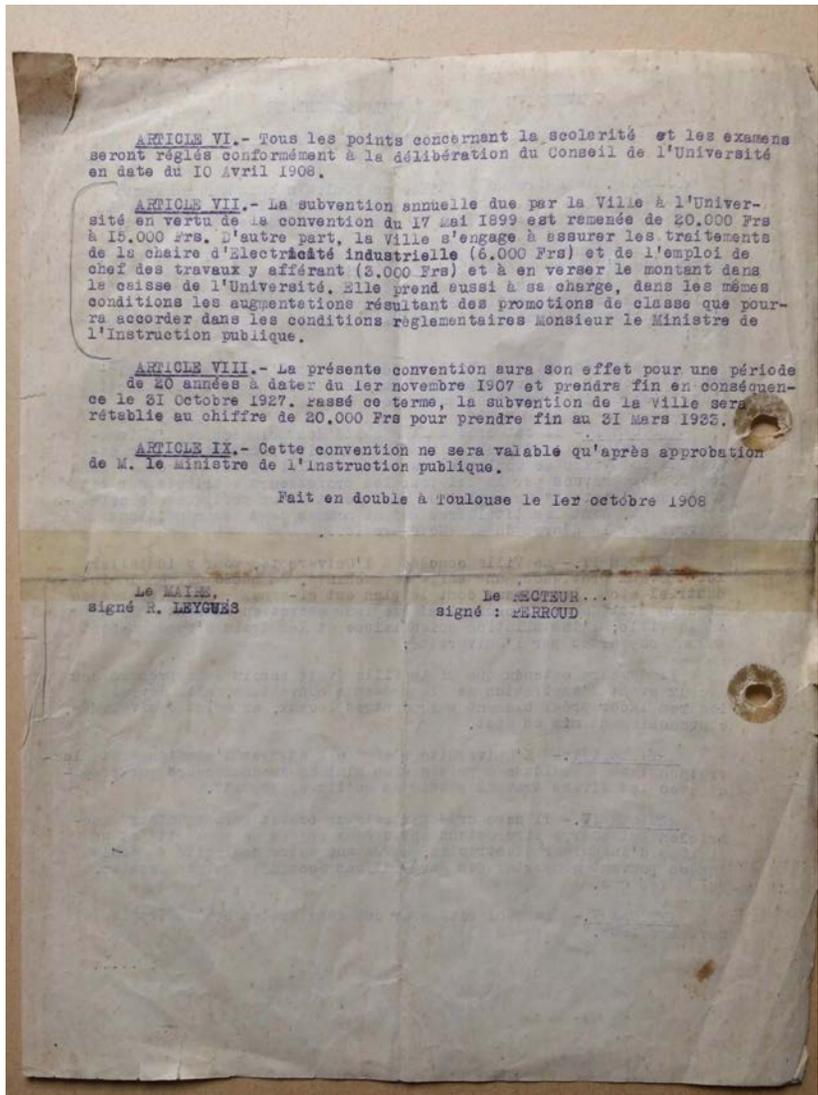


Figure B.2
Convention de
création de l'IET
de Toulouse,
page 2 (1908).

Annexe C

Charles Camichel

C.1. Éléments biographiques

Charles Moïse Camichel naît le 15 septembre 1871 à Montagnac dans l'Hérault. Son père, César Philippe Camichel (1830-1915), pasteur protestant, s'était installé dans ce village après des études à Strasbourg et Genève. Sa mère, Victorine Maria Gluck (1832-1902), issue de la bourgeoisie genevoise, est artiste et musicienne. Charles est le quatrième enfant du couple, arrivé après Adèle, née en 1856, Alfred, né en 1860 et décédé à l'âge de six ans, et Paul, né en 1868. La famille habite le presbytère attenant au temple¹, y menant une existence bourgeoise et ouverte entre un père autoritaire, prédicateur réputé et très actif dans une paroisse étendue, et une mère bien intégrée socialement². Charles est élève de l'école laïque de Montagnac puis des collèges de Pézenas et de Montpellier. Brillant élève, il est reçu en 1889 à l'École polytechnique et à l'École normale supérieure (ENS), et choisit cette dernière.

À l'ENS, Charles prend le goût de la recherche auprès de Marcel Brillouin. Il obtient l'agrégation de sciences physiques en 1892 – il est cette année-là le benjamin des agrégés toutes disciplines confondues. Un poste d'agrégé préparateur lui permet de rester à l'ENS³ où il prépare une thèse, au laboratoire de physique, sur l'absorption de la lumière par les cristaux. Nommé professeur au lycée de garçons de Rennes à compter du 2 octobre 1894⁴, il est autorisé à rester à l'ENS jusqu'à la fin de l'année scolaire 1894-1895 et soutient sa thèse de docteur ès sciences le 13 février 1895 à la faculté des sciences de Paris. Quelques semaines plus tard, le 25 mars 1895, il prend un poste de maître de conférences à la faculté des sciences de Lille.

Camichel se marie le 22 février 1900, à Montpellier, avec Pauline Françoise Charlotte Tréboulon, née le 19 mai 1879 à Cournonterral dans l'Hérault. Ils ont bientôt une fille, Marie Marguerite Pauline. Celle-ci décède le 1^{er} mars 1909 dans sa quatrième année et est inhumée à Montpellier. Cette année malheureuse voit également, en juin, le divorce

¹ Détruit après la révocation de l'Édit de Nantes (1685), le temple de Montagnac a été reconstruit en 1818 dans le style néoclassique tel qu'on le voit aujourd'hui.

² Jean Salvaing, *Quatre siècles de protestantisme à Montagnac*, p. 468-469 (1992).

³ Arrêté de nomination du 13 mai 1893.

⁴ Arrêté du 24 août 1894.

du couple⁵. Camichel est alors domicilié à Toulouse au 35 rue Maignac, rebaptisée à la Libération *rue des Martyrs de la Résistance* – la Gestapo s’était installée pendant la guerre au bout de cette rue.

Camichel prend sa retraite en 1941 et se retire au lieu-dit Cap Daurat sur la commune de Lavaur (Tarn), dans la propriété qu’il a achetée en 1933 avec mademoiselle Philomène Sénégats (1881-1971) – qu’il présente comme sa gouvernante⁶. Cette vaste propriété, dont lui a l’usufruit et elle la nue-propriété, comporte notamment une maison de maître, trois fermes et un bois de cinq hectares. Il décède le 27 janvier 1966 et est inhumé à Montagnac, son village natal, dans la partie du cimetière réservée aux protestants. Philomène Sénégats meurt en 1971, laissant la propriété à sa nièce Hélène Sénégats, célibataire. La propriété est vendue en 1980 à Monsieur et Madame Keller, lesquels, en 2008, en vendent une partie, comprenant la maison de maître, aux actuels propriétaires Monsieur et Madame Perro. Ces derniers y ont aménagé des chambres d’hôtes et un gîte (<http://www.lejardindescedres.com>).

La sœur aînée de Charles, Adèle (1856-1939), s’est mariée en 1879 avec un officier, David Pastourel, qui meurt en 1900 ; elle n’aura pas eu d’enfant. Son frère Paul (1868-1936) fait des études de médecine à Lyon, puis s’installe comme médecin militaire à Agen où il épouse mademoiselle Roller ; leur fils Henri (1907-2003) sera astrophysicien à l’Observatoire du pic du Midi de Bigorre de 1931 à 1977⁷.

Charles Camichel
célébré dans son
village natal, le
29 novembre 1936,
pour son élection
à l’Académie
des sciences
de l’Institut de
France (Arch.
Montagnac). Une
rue du village
porte aujourd’hui
son nom.



⁵ Arch. Nat. F17 24857, dossier administratif de C. Camichel.

⁶ Éléments biographiques communiqués à l’auteur par Madame Perro.

⁷ Davoust (2000).

C.2. Fonctions et titres

Carrière

- Reçu à l'École polytechnique et à l'École normale supérieure en 1889, Camichel choisit cette dernière
- Agrégé-préparateur à l'École normale supérieure (1892-1894)
- Professeur au lycée de Rennes (1895)
- Docteur ès sciences (1895)
- Maître de conférences à la faculté des sciences de Lille (1895-1900)
- Maître de conférences (1900-1907) puis professeur à la faculté des sciences de Toulouse (1907-1941)
- Directeur de l'institut électrotechnique et de mécanique appliquée de l'université de Toulouse (1909-1941)
- Directeur de l'institut de mécanique des fluides de l'université de Toulouse (1931-1941).

Titres et distinctions

- Lauréat de l'Institut en 1919 et 1929 (prix Bazin)
- Chevalier de la Légion d'honneur (1920) pour services rendus comme engagé volontaire en 1914-1915, puis Officier (1926) et Commandeur (1952)
- Membre correspondant de l'Institut (1922) puis membre non résidant (1936, Académie des sciences, section des sciences appliquées)
- Membre de l'Instituto de Coïmbra (Portugal) (1925)
- Professeur d'échange à l'université de Bruxelles (1931)
- Médaille d'or de l'Office national des recherches scientifiques et industrielles et des inventions (1931).

Autres fonctions

- Membre du Comité consultatif de l'Enseignement supérieur au ministère de l'Instruction publique (avant 1929)
- Membre du Comité d'études et de recherches scientifiques pour l'aménagement et l'utilisation des forces hydrauliques du ministère des Travaux publics
- Membre du Comité national français de géodésie et de géophysique
- Membre de la Commission interministérielle chargée de la direction des expériences sur les barrages et les grands ouvrages hydrauliques
- Membre du Comité technique de la Société hydrotechnique de France et des comités de diverses sociétés savantes
- Vice-président puis président (1930) de la section d'hydraulique générale de la Société hydrotechnique de France.

Annexe D

Titres et distinctions de Léopold Escande

Professeur Léopold ESCANDE

Membre de l'Académie des Sciences de l'Institut de France
 Conseiller de la Délégation Générale à la Recherche Scientifique
 Président d'Honneur de l'Institut National Polytechnique de Toulouse
 Directeur Honoraire de l'Ecole Nationale Supérieure d'Electrotechnique
 d'Electronique, d'Informatique et d'Hydraulique de Toulouse
 Membre d'Honneur et Ancien Président
 de l'Association Internationale de Recherches Hydrauliques

—

DIPLOMES ET DISTINCTIONS SCIENTIFIQUES

Ingénieur I.E.T. - Licencié ès Sciences - Docteur ès Sciences
 Membre de l'Académie des Sciences de Paris (Institut de France) 1954

<u>Docteur Honoris Causa des 17</u>	<u>Membre ou Membre Correspondant des 21</u>
<u>Universités étrangères suivantes</u>	<u>Académies des Sciences suivantes</u>
- Recife (Brésil) 1953	- Coimbra (Portugal) 1937
- Sao Paulo (Brésil) 1956	- Toulouse (France) 1945
- Lisbonne (Portugal) 1956	- Rio de Janeiro (Brésil) 1954
- Liège (Belgique) 1957	- Paris (France) 1954
- Porto Alegre (Brésil) 1957	- Lima (Pérou) 1955
- Lima (Pérou) 1957	- Bologne (Italie) 1956
- Vienne (Autriche) 1961	- Bogota (Colombie) 1956
- Gand (Belgique) 1962	- Madrid (Espagne) 1956
- Buenos Aires (Argentine) 1963	- Barcelone (Espagne) 1956
- Berlin (Allemagne) 1964	- Mexico (Mexique) 1959
- Cracovie (Pologne) 1964	- Belgrade (Yougoslavie) 1959
- Salonique (Grèce) 1966	- Milan (Italie) 1960
- Sherbrooke (Canada) 1966	- Padoue (Italie) 1960
- Rio de Janeiro (Brésil) 1966	- Buenos Aires (Argentine) 1960
- Gênes (Italie) 1967	- Caracas (Venezuela) 1960
- Bath (Grande Bretagne) 1968	- Varsovie (Pologne) 1960
- Sarajevo (Yougoslavie) 1971	- Gênes (Italie) 1961
	- Zagreb (Yougoslavie) 1961
<u>Professeur Honoraire des trois</u>	- Naples (Italie) 1961
<u>Universités étrangères suivantes</u>	- New York (USA) Honor. Member 1962
- Belo Horizonte (Brésil) 1960	- Sofia (Bulgarie) 1966
- Mexico (Mexique) 1960	<u>Chercheur Honoris Causa</u>
- Asuncion (Paraguay) 1961	- Lisbonne (Labor. National) 1972

Membre Correspondant de l'Académie des Docteurs de Madrid (Espagne) 1974
 Membre Etranger de la Société Polonaise de Mécanique Théorique et Appliquée 1975

DECORATIONS

Chevalier de l'Etoile Noire du Bénin	1930
Chevalier de la Légion d'Honneur	1948
Officier de la Légion d'Honneur	1956
Décoré de l'Etoile de Yougoslavie	1957
Commandeur dans l'Ordre des Palmes Académiques	1959
Chevalier du Ministère de l'Education Nationale de l'Iran	1960
Commandeur de l'Ordre Royal de Georges 1er de Grèce	1961
Commandeur de l'Ordre National du Cèdre (Liban)	1962
Commandeur de la Légion d'Honneur	1964
Grand Officier de l'Ordre National du Mérite	1968
Médaille de l'Aéronautique	1968
Ordre "Cyrille et Méthode" première classe (Bulgarie)	1970
Grand Officier de la Légion d'Honneur	1973
Médaille de la Commission de l'Education Nationale (Pologne)	1974
Grand Croix de l'Ordre National du Mérite	1975

Figure D.1 Titres et distinctions de Léopold Escande en 1980 (Arch. Acad. Sc.).

Annexe E

Sources documentaires

E.1. Archives nationales

Sous-série F17 (ministère de l'Instruction publique)

- F17 17147, comité des travaux historiques et scientifiques, correspondance de Villat
- F17 17267, service des missions, subventions de la Caisse des recherches scientifiques à Bénard
- F17 17466, CNRS, correspondance laboratoires 1938-1941, replis
- F17 17492, Office national des recherches scientifiques et industrielles et des inventions (ONRSII), correspondance avec le ministère de la Guerre
- F17 17493, ONRSII, correspondance avec le ministère de l'Air, 1935-1939
- F17 17494, ONRSII, laboratoires de Bellevue
- F17 17495, ONRSII, laboratoires de Bellevue
- F17 14566, institut électrotechnique de Toulouse (1919-1946) et IMF de Toulouse (1936-1938)
- F17 24857, dossier de carrière de Charles Camichel
- F17 29049, dossier de carrière de Max Teissié-Solier
- F17 30287, dossier de carrière de Pierre Dupin.

Sous-série AJ16 (académie de Paris)

- AJ16 5123, conseils de la faculté des sciences de Paris 1902-1923
- AJ16 5732 à AJ16 5754, dossiers administratifs du personnel de l'académie de Paris, né entre 1850 et 1900.
- AJ16 5758, rapports annuels du doyen de la faculté des sciences, 1929-1942
- AJ16 5759, correspondance de la faculté des sciences
- AJ16 5775, instituts de mécanique des fluides, 1929-1941
- AJ16 5776, instituts de mécanique des fluides
- AJ16 5822, CNRS, affectations spéciales 1938-1940.

Autres dossiers consultés

- 313AP 208, correspondance privée de Paul Painlevé 1923-1924

- 3W 66, Haute Cour de justice, affaire Bergeret (microfiches)
- 19800284 13-14, CNRSA, mobilisation scientifique 1938-1939,
- 19800284 39-40, CNRSA, comité de mécanique des fluides de l'institut de la recherche scientifique appliquée à la Défense nationale
- 19800284 51-52, CNRSA, correspondance (Breton, Brun, IPO Nantes...)
- 19800284 53-54, CNRSA, correspondance (Pérès, Valensi, Rocard...)
- 20010498 160, laboratoire de mécanique physique (Paris).

E.2. Archives universitaires et départementales

Institut de mécanique de Paris

L'institut d'Alembert de la faculté des sciences et d'ingénierie de Sorbonne-Université (ex-université Pierre et Marie Curie) conserve les archives de la chaire d'Aviation fondée en 1909 par Basil Zaharoff¹. Ce fonds, très riche, contient plus de 2000 ouvrages et revues. Un sommaire en est disponible sur le site internet de cet institut.

Le site Wikipedia offre un historique des chaires de la faculté des sciences de Paris et une liste des thèses de mathématiques de cette faculté.

Instituts de Toulouse (IET et IMFT)²

Les archives de l'institut électrotechnique et de l'institut de mécanique des fluides de Toulouse sont conservées à l'ENSEEIH³ et à l'IMFT.

Les archives du département de la Haute-Garonne conservent certains documents administratifs relatifs à l'institut électrotechnique, à son laboratoire d'hydraulique, et à la création de l'institut de mécanique des fluides (cotes 2559 W 159 et 2559 W 162)³. Ces archives conservent également les procès-verbaux, numérisés, des séances des assemblées et conseils des facultés de l'université de Toulouse :

https://archives.haute-garonne.fr/archive/fonds/FRAD031_conseils-facultes/n:380#top

On y trouve également l'ensemble des rapports d'essais en soufflerie réalisés pour l'industrie aéronautique entre 1939 et 1996 (fonds 7003 W), dont le sommaire est disponible sur internet :

https://archives.haute-garonne.fr/archive/fonds/FRAD031_7003W/view:73863

¹ L'auteur remercie Renée Gatignol, professeur émérite, pour son accueil pour la consultation de ce fonds.

² Remerciements à Caroline Barrera, maître de conférences en histoire contemporaine au laboratoire Framespa, pour les renseignements et documents relatifs à l'histoire et aux archives de l'université de Toulouse. L'auteur remercie également Emmanuel Davoust, professeur émérite à l'observatoire Midi-Pyrénées, pour lui avoir remis des documents ayant appartenu à Charles Camichel, transmis par Henri Camichel, astronome et neveu de Charles.

³ Remerciements à Pascal Gaste, archiviste, pour son accueil.

Un dépôt de 592 photographies a été réalisé en novembre 2021 par l'Institut de mécanique des fluides de Toulouse (producteur), cotes extrêmes 8435 W 1 - 592 :
https://archives.haute-garonne.fr/archive/fonds/FRAD031_8435W

Les archives des *Annales de la faculté des sciences de Toulouse*, numérisées dans le cadre du programme *NumDam*, sont disponibles sur le site :
<http://picard.ups-tlse.fr/~annaes/>

E.3. Archives de l'Académie des sciences

Tout correspondant ou membre de l'Académie des sciences possède un dossier dans les archives de cette Académie, à l'Institut de France. Quelques prétendants non élus y ont également un dossier. Ces dossiers comportent notamment une notice des titres et travaux. Dossiers notamment consultés : C. Camichel, G. Darrieus, L. Escande, É. Jouguet, T. von Kármán, J. Pérès, A. Rateau, L. Roy, G. I. Taylor, H. Villat.

Notices biographiques numérisées (également disponibles via le site gallica de la BNF, voir ci-dessous) :

<https://www.academie-sciences.fr/fr/Notes-biographiques/notes-biographiques.html>

E.4. Site gallica et autres sites internet

Le site internet *gallica* de la Bibliothèque nationale de France (BNF) offre de nombreux documents numérisés intéressant l'histoire des sciences et l'histoire de l'aéronautique. Ci-dessous quelques liens, vers *gallica* et vers d'autres sites.

Publications de l'Académie des sciences.

- Notes aux *Comptes Rendus* publiées entre 1835 et 1965 :
<https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/cb343481087/date.langFR>
- Table générale des *Comptes Rendus*, par auteur, de 1926 à 1940 (tomes 182 à 211) :
<https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k3215w/>
- Notices et discours (1924-1974, six volumes) :
<https://catalogue.bnf.fr/ark:/12148/cb37420265k>

Autres revues.

- *Revue générale des sciences pures et appliquées* (1890-1947) :
<https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/cb343784049/>
- *Annales de Chimie et de Physique* (1816-1913) (où est notamment publiée la thèse de Bénard) :
<https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/cb343780820/>

Collections du Musée Air France. Le musée Air France a numérisé une partie de son important fonds documentaire, dont plusieurs revues techniques ou généralistes sur la

conquête de l'air (*L'Aérophile, L'Aéronautique, Revue du ministère de l'Air...*), disponibles sur gallica :

<https://gallica.bnf.fr/edit/und/musee-air-france>

Bibliothèque numérique française de mathématiques. De nombreuses publications à caractère théorique citées dans cet ouvrage sont disponibles sur le site *Numdam* de la bibliothèque numérique française de mathématiques :

<http://www.numdam.org/>

UMS Persée. L'unité mixte de service (UMS) Persée (ENS Lyon - CNRS) offre un grand nombre de documents numérisés, et notamment deux dictionnaires biographiques par C. Charle et E. Telkès : celui des professeurs de la faculté des sciences de Paris (1901-1939) :

https://www.persee.fr/issue/inrp_0298-5632_1989_ant_25_1

et celui des professeurs au Collège de France :

https://www.persee.fr/issue/inrp_0298-5632_1988_ant_3_1

Références

Bibliographie primaire

On donne ici les références bibliographiques citées dans l'ouvrage, hors thèses. Une liste exhaustive des thèses de doctorat ès sciences réalisées à l'IET-ENSEEIHHT entre 1907 et 1967 est donnée dans l'annexe A. Pour plus d'exhaustivité, on trouvera dans une plaquette de présentation de l'ENSEEIHHT, conservée à l'IMFT, une recension des 524 publications (hors thèses) issues « des laboratoires d'hydraulique » entre 1914 et 1959, ainsi que les 136 études de grands ouvrages hydrauliques¹. Une seconde plaquette éditée en 1966 complète la recension des études d'ouvrages réalisées jusqu'à cette date.

- Association Amicale des Ingénieurs Anciens Élèves de l'IETMA de Toulouse 1936 *M. Charles Camichel à l'Académie des sciences*. Toulouse : Les Frères Douladoure.
- Baubiac, J. 1936 *Étude expérimentale, en régime transitoire, du sillage et de la résistance des corps immergés*. PST n° 98. Ministère de l'Air.
- Brillouin, M. 1911 Les surfaces de glissement d'Helmholtz et la résistance des fluides. *Ann. de Chim. et de Phys.* **23**, 145–230.
- Camichel, C. 1895 *Étude expérimentale sur l'absorption de la lumière par les cristaux*. Paris : Gauthier-Villars, thèse de la faculté des sciences de Paris, rééd. *Ann. Phys. Chimie* 5, 433–493 (1895).
- Camichel, C. 1914 *Organisation de l'Institut Électrotechnique et de Mécanique Appliquée - Description sommaire des laboratoires*. Paris : Dunod & Pinat, Privat (Toulouse).
- Camichel, C. 1915 Sur les coups de bélier ; conduite entièrement purgée. *C. R. Acad. Sc. Paris* **161**, 412.
- Camichel, C. 1916a L'amplitude des harmoniques impairs dans les conduites forcées. *La Lumière Électrique* **34** (37), 241–247.
- Camichel, C. 1916b Sur les coups de bélier ; examen de l'état d'une conduite. *C. R. Acad. Sc. Paris* **163**, 150.
- Camichel, C. 1919a Le projet de loi Pottevin et les instituts techniques d'universités. *Revue Gén. Sc. Pures Appl.* **30** (2), 39–44.
- Camichel, C. 1919b Sur la détermination des vitesses dans les liquides. *Revue Générale de l'Électricité* **6** (21), 707–709.
- Camichel, C. 1920a Application du principe des images aux chambres d'eau. *C. R. Acad. Sc. Paris* **170**, 1106.
- Camichel, C. 1920b Sur le régime permanent dans les chambres d'eau. *C. R. Acad. Sc. Paris* **170**, 881.

¹ Escande (1959).

- Camichel, C. 1920c Sur le régime permanent dans les chambres d'eau. *C. R. Acad. Sc. Paris* **170**, 986.
- Camichel, C. 1920d Sur le régime permanent dans les chambres d'eau. *Revue Générale de l'Électricité* **8** (11), 331–338.
- Camichel, C. 1922 Sur les surfaces de discontinuité. *C. R. Acad. Sc. Paris* **174**, 666.
- Camichel, C. 1925a Applications des lois de similitude à l'étude des phénomènes qui se produisent à l'aval d'un corps immergé dans un fluide visqueux en mouvement. *La Technique Aéronautique* (49), 322–333.
- Camichel, C. 1925b Applications des lois de similitude à l'étude des phénomènes qui se produisent à l'aval d'un corps immergé dans un fluide visqueux en mouvement (suite). *La Technique Aéronautique* (50), 371–381.
- Camichel, C. 1925c L'emploi des modèles réduits. In *Actes du 3^e Congrès de la Houille Blanche, Grenoble*, p. 953–982.
- Camichel, C. 1927 Sur les tourbillons provoqués par un obstacle immergé dans un courant liquide. *C. R. Acad. Sc. Paris* **184**, 1509.
- Camichel, C. 1929 *Notice sur les travaux scientifiques*. Toulouse : Privat.
- Camichel, C. 1930 *Leçons sur les conduites*. Paris : Gauthier-Villars.
- Camichel, C. 1931 *Supplément à la Notice sur les travaux scientifiques – Travaux effectués pendant les années 1930 et 1931*. Toulouse : Privat.
- Camichel, C. 1935a 2^e *Supplément à la Notice sur les travaux scientifiques – Travaux effectués pendant les années 1932 à 1935*. Toulouse : Privat.
- Camichel, C. 1935b Contribution à l'étude des veines liquides – les indéterminations et les solutions multiples dans leurs rapports avec l'hydraulique fluviale. *Revue Générale de l'Hydraulique* (5-6), 1–15.
- Camichel, C., Beau, F. & Escande, L. 1932 La similitude des ouvrages courts : expériences sur la grande forme de radoub du port du Havre. *C. R. Acad. Sc. Paris* **195**, 473.
- Camichel, C. & collab. 1932 Contribution to the study of the flow of viscous liquids. *J. Rheol.* **3**, 413–436.
- Camichel, C., Crescent, C. & Escande, L. 1931a Contribution à l'étude des évacuateurs de crue à galerie souterraine. *Revue Générale de l'Électricité* **30** (16), 625–627.
- Camichel, C. & Dupin, P. 1931 Sur les divers modes de contraction des filets à l'entrée d'un ajutage. *C. R. Acad. Sc. Paris* **193** (2), 102.
- Camichel, C., Dupin, P. & Teissié-Solier, M. 1927 Sur l'application de la loi de similitude aux périodes de formation des tourbillons de Bénard-Kármán. *C. R. Acad. Sc. Paris* **185**, 1556–1559.
- Camichel, C., Dupin, P. & Teissié-Solier, M. 1928 Sur l'existence, dans l'écoulement d'un fluide autour de cylindres immergés, d'un phénomène périodique en régime de Poiseuille. *C. R. Acad. Sc. Paris* **186**, 203–205.
- Camichel, C. & Escande, L. 1923 Sur la similitude. *C. R. Acad. Sc. Paris* **177**, 1180–1183.
- Camichel, C. & Escande, L. 1925 Expériences sur la similitude hydrodynamique. *Le Génie Civil* **86** (3), 60–63.
- Camichel, C. & Escande, L. 1934 Contribution à l'étude sur modèles réduits des affouillements. *C. R. Acad. Sc. Paris* **199**, 992.

- Camichel, C. & Escande, L. 1938 *Similitude hydrodynamique et technique des modèles réduits* (356 p.). PST n° 127. Ministère de l'Air.
- Camichel, C., Escande, L. & Dupin, P. 1935a Les indéterminations dans le phénomène de l'élargissement brusque ; influence des conditions initiales. *C. R. Acad. Sc. Paris* **200**, 283.
- Camichel, C., Escande, L. & Ricaud, M. 1925 Sur l'écoulement d'un fluide visqueux autour d'un obstacle. *C. R. Acad. Sc. Paris* **180**, 1557.
- Camichel, C. & Eydoux, D. 1918 Le Laboratoire d'hydraulique de l'Institut Électrotechnique de Toulouse. *La Houille Blanche* (2), 175–179.
- Camichel, C., Eydoux, D. & Gariel, M. 1918 *Étude théorique et expérimentale des coups de bélier. Essais faits à l'institut électrotechnique de Toulouse et à l'usine hydroélectrique de Soulom*. Toulouse : Privat, In-4°, 398 p. Ouvrage reproduit dans les *Annales de la faculté des sciences de Toulouse*, 3^e série, t. 8 & 9.
- Camichel, C., Eydoux, D. & Lhériaud, J. 1914a Expériences sur l'enregistrement des débits, des conduites forcées de l'usine de Soulom. *La Lumière Électrique* **26** (31), 129–139.
- Camichel, C., Eydoux, D. & Lhériaud, J. 1914b Le jaugeur Venturi. In *Rapports qui devaient être présentés au 2^e Congrès de la Houille Blanche, à Lyon en septembre 1914*, p. 23–44. Paris : Chambre syndicale des forces hydrauliques.
- Camichel, C., Eydoux, D. & Lhériaud, J. 1915 Sur l'ajutage Venturi. *C. R. Acad. Sc. Paris* **160**, 28–31.
- Camichel, C., Parmentier, J. & Escande, L. 1935b *Les indéterminations et les solutions multiples dans leurs rapports avec l'hydraulique fluviale*. Paris : Dunod.
- Camichel, C., Parmentier, J. & Escande, L. 1935c L'étude des veines liquides - Expériences effectuées sur des modèles réduits et au barrage de Vives-Eaux, sur la Seine. *Le Génie Civil* **107** (7), 156–158.
- Camichel, C. & Ricaud, M. 1924 Sur les surfaces de discontinuité. *C. R. Acad. Sc. Paris* **178**, 442.
- Camichel, C., Leclerc du Sablon, J. & Escande, L. 1931b Recherches sur la similitude (suite et fin). *Le Génie Civil* **98** (17), 420–424.
- Camichel, C. & Teissié-Solier, M. 1935 Influence d'une perturbation sur le sillage en régime de Poiseuille d'un corps immergé. *C. R. Acad. Sc. Paris* **200**, 704–707.
- Crausse, E. 1936 *Contribution à l'étude expérimentale de phénomènes transitoires et de phénomènes périodiques se produisant dans les liquides en mouvement*. PST n° 95. Ministère de l'Air.
- Crausse, E. 1943 *Résultats expérimentaux concernant la répartition des vitesses en canaux découverts*. Publications Scientifiques et Techniques de l'École Française d'Ingénieurs de Beyrouth.
- Crausse, E. & Baubiac, J. 1931a Sur l'application d'une méthode d'enregistrement thermique à l'étude des tourbillons se produisant dans les liquides. *C. R. Acad. Sc. Paris* **192** (22), 1355–1357.
- Crausse, E. & Baubiac, J. 1931b Sur les tourbillons secondaires se produisant à l'aval d'un obstacle immergé dans un liquide. *C. R. Acad. Sc. Paris* **192** (24), 1529–1531.
- Crausse, E. & Baubiac, J. 1933 Sur une modification de la méthode chronophotographique et quelques applications. *C. R. Acad. Sc. Paris* **196**, 466.
- Dupin, P. 1929 Sur une nouvelle méthode de la mesure de la vitesse des fluides basée sur l'emploi d'oscillateurs à lampes. *C. R. Acad. Sc. Paris* **188**, 546.

- Dupin, P. 1930 Sur la vibration des tiges cylindriques dans l'eau sous l'influence des tourbillons alternés. *C. R. Acad. Sc. Paris* **191**, 482.
- Dupin, P. & Crausse, E. 1931 Sur les vibrations des tiges cylindriques dans l'eau sous l'influence des tourbillons alternés. *C. R. Acad. Sc. Paris* **192** (12), 729.
- Dupin, P. & Teissié-Solier, M. 1928 *Les tourbillons alternés et les régimes d'écoulement d'un fluide autour d'un obstacle*. Paris : Publications de l'IETMA de l'université de Toulouse, Gauthier-Villars.
- Dupin, P. & Teissié-Solier, M. 1930 Sur les tourbillons alternés en régime non turbulent et en régime turbulent. *C. R. Acad. Sc. Paris* **190** (15), 920.
- Dupin, P. & Teissié-Solier, M. 1931 Sur les tourbillons alternés de Bénard-Kármán et la loi de similitude hydrodynamique de Reynolds. *C. R. Acad. Sc. Paris* **192** (17), 1017.
- Eiffel, G. 1912 Sur la résistance des sphères dans l'air en mouvement. *C. R. Acad. Sc. Paris* **155**, 1597–1599.
- Eiffel, G. 1914 *Nouvelles Recherches sur la Résistance de l'Air et l'Aviation faites au laboratoire d'Auteuil*. Paris : Dunod & Pinat.
- Escande, L. 1929 Étude théorique et expérimentale sur la similitude des fluides incompressibles pesants. *Revue Générale de l'Électricité* **26**, 173–184, 207–216, 243–255, 279–293.
- Escande, L. 1940 *Étude de quelques écoulements comportant la formation d'une veine de courant. Vannes de fond, barrages-déversoirs, piles de pont*. PST n° 163. Ministère de l'Air.
- Escande, L. 1943 *Recherches théoriques et expérimentales sur les oscillations de l'eau dans les chambres d'équilibre*. PST n° 187. Ministère de l'Air.
- Escande, L. 1950 *Hydraulique générale*. Toulouse : Privat, 2^e éd. (1943 pour la 1^{re} éd.).
- Escande, L. 1959 *Les laboratoires d'hydraulique de l'École nationale supérieure d'électrotechnique, d'électronique et d'hydraulique de Toulouse*. Toulouse : Privat.
- Escande, L. & Ricaud, M. 1925a Les lois de la similitude des fluides incompressibles et les modèles en charge. *Revue Générale de l'Électricité* **18** (7), 769–773.
- Escande, L. & Ricaud, M. 1925b Sur la similitude des fluides visqueux. *C. R. Acad. Sc. Paris* **180**, 1326.
- Foch, A. 1932 *Introduction à la mécanique des fluides*. Paris : A. Colin (rééd. 1952).
- Foch, A. 1934 *Acoustique*. Paris : A. Colin (rééd. 1942).
- Jouguet, E. 1924 Indications historiques sur l'application des lois de la similitude mécanique au mouvement des fluides. *La Technique Aéronautique* (29), 70–78.
- Lamb, H. 1932 *Hydrodynamics*, 6^e éd. Cambridge : Cambridge University Press.
- Lapresle, A. 1949 Recherches des laboratoires aérodynamiques pendant les années 1933-1947. In *Quinze ans d'aéronautique française – 1932-1947*, p. 39–162. Paris : Union syndicale des industries aéronautiques.
- Leroux, P. 1925 Le laboratoire d'essais et de recherches de la Société hydrotechnique de France à Beauvert (Grenoble). *Revue Générale de l'Électricité* **18**, 233–240.
- de Parville, H. 1883 *L'électricité et ses applications - Exposition de Paris*. Paris : G. Masson.
- Perrin, J. 1913 *Les Atomes*. Paris : Librairie Félix Alcan, rééd. CNRS Editions (2014).

- Pichot, M. & Dupin, P. 1931 Sur la répartition des vitesses dans les solutions colloïdales présentant des anomalies de viscosité. *C. R. Acad. Sc. Paris* **192** (18), 1079.
- Pöschl, T. 1926 Zweiter Internationaler Kongreß für Technische Mechanik in Zürich. *Naturwissenschaften* **14**, 1029–1032.
- Rocard, Y. 1951 *Électricité*. Paris : Masson et C^{ie} (rééd. 1956, 1966).
- Sabathé, G. 1936 Sur l'origine et la suppression de la discontinuité dans la résistance hydrodynamique des flotteurs d'hydravions. *C. R. Acad. Sc. Paris* **202**, 1836.
- Société Hydrotechnique de France 1922 Inauguration du laboratoire d'hydraulique de Bauvert à Grenoble. *La Houille Blanche* **19** (6), 214–219.
- Swyngedauw, R. 1905 L'enseignement technique dans les universités. L'institut électrotechnique de l'université de Lille. *Revue générale des sciences pures et appliquées* **16**, 316–323.
- Teissié-Solier, M. & Castagnetto, L. 1938 Sur la détermination du critérium des tourbillons alternés et les oscillations de relaxation. *C. R. Acad. Sc. Paris* **206**, 1279.

Bibliographie secondaire

- Aitken, H. G. J. 1985 *The Continuous Wave : Technology and American Radio, 1900-1932*. Princeton : Princeton University Press.
- Albertini, L., dir. 2010 *Cent ans d'agronomie à Toulouse. INP-ENSAT. 1909-2009*. La Tour d'Aigues : Éditions de l'Aube.
- Anduaga, A. 2016 *Geophysics, Realism, and Industry*. Oxford : Oxford University Press.
- Atten, M. 2006 La transformation de la science électrique à la fin du XIX^e siècle. In *Un siècle de formation des ingénieurs électriciens. Ancrage local et dynamique européenne, l'exemple de Nancy* (dir. F. Birck & A. Grellon), p. 157–170. Paris : Éd. de la Maison des sciences de l'homme.
- Aubin, D. 2017 Ballistics, fluid mechanics, and air resistance at Gâvre, 1829-1915. *Arch. Hist. Exact Sci.* **71** (6), 509–542.
- Badel, L., dir. 1997 *La naissance de l'ingénieur électricien - Origine et développement des formations nationales électrotechniques*. Paris : Association pour l'histoire de l'électricité en France & Presses Universitaires de France.
- Banal, M., Perrin, M. & Thirriot, C. 2002 Histoire de la SHF. *La Houille Blanche* (4/5), 15–19.
- Barrera, C., dir. 2020a *Histoire de l'université de Toulouse. Vol. 3 : L'époque contemporaine (XIX^e-XXI^e siècles)*. Portet-sur-Garonne : Éditions midi-pyrénéennes.
- Barrera, C. 2020b Les étudiants étrangers et coloniaux (XIX^e-XXI^e siècle). In *Histoire de l'université de Toulouse (XIII^e-XXI^e siècles), vol. 3, III* (dir. C. Barrera), p. 549–563. Portet-sur-Garonne : Éditions midi-pyrénéennes.
- Barrera, C. 2020c Les universitaires toulousains (XIX^e-XXI^e siècle). In *Histoire de l'université de Toulouse (XIII^e-XXI^e siècles), vol. 3, III* (dir. C. Barrera), p. 227–254. Portet-sur-Garonne : Éditions midi-pyrénéennes.
- Barrera, C. 2020d L'université dans la guerre. In *Histoire de l'université de Toulouse (XIII^e-XXI^e siècles), vol. 3, III* (dir. C. Barrera), p. 567–591. Portet-sur-Garonne : Éditions midi-pyrénéennes.

- Barrera, C. & Grossetti, M. 2020a La rénovation de l'enseignement supérieur toulousain (1870-1940). In *Histoire de l'université de Toulouse (XIII^e-XXI^e siècles)*, vol. 3, II (dir. C. Barrera), p. 45-79. Portet-sur-Garonne : Éditions midi-pyrénéennes.
- Barrera, C. & Grossetti, M. 2020b L'enseignement supérieur toulousain de 1945-1968. In *Histoire de l'université de Toulouse (XIII^e-XXI^e siècles)*, vol. 3, III (dir. C. Barrera), p. 81-111. Portet-sur-Garonne : Éditions midi-pyrénéennes.
- Barrera, C. & Jalaudin, C. 2020 Les effectifs étudiants de l'université toulousaine XIX^e-XXI^e siècle. In *Histoire de l'université de Toulouse (XIII^e-XXI^e siècles)*, vol. 3, II (dir. C. Barrera), p. 463-487. Portet-sur-Garonne : Éditions midi-pyrénéennes.
- Bauer, E. 1981 électricité et magnétisme (1790-1895). In *Histoire Générale des Sciences. La science contemporaine (tome 3). I. Le XIX^e siècle* (dir. R. Taton), p. 201-260. Paris : PUF, 2^e éd.
- Belhoste, B. & Chatzis, K. 1998 L'enseignement de la mécanique appliquée en France au début du XX^e siècle. In *Histoire de la mécanique appliquée* (dir. C. Fontanon). Fontenay-aux-Roses : ENS Éditions.
- Birck, F. 1996 Le développement de l'enseignement supérieur à Nancy après 1870 ; une volonté politique. In « *Villes et institutions scientifiques* », rapport pour le PIR-Villes, CNRS (dir. M. Grossetti), p. 75-96.
- Birck, F. 2006a De l'institut électrotechnique de Nancy à l'école nationale supérieure d'électricité et de mécanique (1900-1960). In *Un siècle de formation des ingénieurs électriciens. Ancrage local et dynamique européenne, l'exemple de Nancy* (dir. F. Birck & A. Grelon), p. 23-88. Paris : Éd. de la Maison des sciences de l'homme.
- Birck, F. 2006b L'IEN et les milieux industriels (1900-1960). In *Un siècle de formation des ingénieurs électriciens. Ancrage local et dynamique européenne, l'exemple de Nancy* (dir. F. Birck & A. Grelon), p. 171-194. Paris : Éd. de la Maison des sciences de l'homme.
- Birck, F. & Grelon, A., dir. 2006 *Un siècle de formation des ingénieurs électriciens. Ancrage local et dynamique européenne, l'exemple de Nancy*. Paris : Éd. de la Maison des sciences de l'homme.
- Birck, F. & Rollet, L. 2015 La faculté des sciences de Nancy dans le processus de constitution d'universités régionales (1854-1918). In *L'université à Nancy et en Lorraine : histoire, mémoire et perspective* (dir. J. El Gammal, E. Germain & F. Lormant), p. 82-112. Nancy : PUN - Éditions universitaires de Lorraine.
- Blondel, C. 1990 Négociations entre savants, industriels et administrateurs : les premiers congrès internationaux d'électricité. *Relations internationales* 62, 171-182.
- Blondel, C. 1993 Branly face à l'innovation technique : un cas d'espèce ? *Revue d'histoire des sciences* 46, 39-58.
- Blondel, C. 1994 *Histoire de l'électricité*. Paris : Pocket.
- Blondel, C. 1998 Les physiciens français et l'électricité industrielle à la fin du XIX^e siècle. *Physis ; rivista internazionale di storia della scienza, Leo Olschki Editore* 35 (2), 245-271.
- Blondel, C. 2010 La reconnaissance de l'électricité médicale et ses « machines à guérir » par les scientifiques français (1880-1930). *Annales historiques de l'électricité* (8), 37-51.
- Blondel, C. & Wolff, B. 2009 Ampère et l'histoire de l'électricité – Histoire de l'électricité et du magnétisme. Url : www.ampere.cnrs.fr/.
- Bloor, D. 2011 *The enigma of the aerofoil - Rival theories in aerodynamics, 1909- 1930*. Chicago : The University of Chicago Press.

- Boisson, H.-C. & Crausse, P. 2014 *De l'aérodynamique à l'hydraulique. Un siècle d'études sur modèles réduits*. Toulouse : Cépaduès.
- Bories, S. 2008 Jean Nougaro (1922-2008). Url : www.academie-sciences-lettres-toulouse.fr/?p=6810.
- Borvon, G. 2009 *Histoire de l'électricité - De l'ambre à l'électron*. Paris : Vuibert.
- Bouneau, C. 1988 Le personnel de l'industrie électrique dans le sud-ouest durant la première moitié du XX^e siècle : les électriciens de la Compagnie du Midi. *Bulletin d'histoire de l'électricité - Association pour l'histoire de l'électricité en France* (11), 145–167.
- Bouneau, C. 1989 La Compagnie du Midi, acteur du développement régional du grand Sud-Ouest (1852-1938). Histoire ferroviaire et histoire économique. *Techniques & Culture (Maison des Sciences de l'Homme, Paris)* 19, 159–169.
- Bouneau, C. 1992 Les élites face à l'innovation électrique dans le grand Sud-Ouest au tournant des XIX^e et XX^e siècles. In *Les élites fins de siècles* (dir. S. Guillaume), p. 79–95. Bordeaux : Maison des Sciences de l'Homme d'Aquitaine.
- Bouneau, C. 1997 *L'électrification du grand Sud-Ouest de la fin du XIX^e siècle à 1946*. Bordeaux : Fédération historique du Sud-Ouest.
- de Broglie, L. 1947 *Physique et microphysique*. Paris : Albin Michel.
- de Broglie, M. & Maurain, C. 1937 Funérailles de Paul Janet. *Académie des sciences – Notices et discours* 5, 21–26.
- Cardot, F. 1991 Le milieu des électriciens. In *Histoire générale de l'électricité en France, tome 1 (1881-1918)* (dir. F. Caron & F. Cardot), p. 17–33. Paris : Fayard.
- Chadeau, E. 1987 *L'industrie aéronautique en France, 1900–1950. De Blériot à Dassault*. Paris : Fayard.
- Charle, C. & Telkès, E. 1989 *Les Professeurs de la faculté des sciences de Paris – Dictionnaire biographique 1901-1939*. Paris : INRP.
- Charru, F. 2021 *Ailes, Nuages et Tourbillons. La mécanique des fluides en France de 1900 à 1950 - Une politique nationale*. Basel : Birkhäuser, Springer.
- Charru, F. 2023 Fluid Mechanics in France in the First Half of the Twentieth Century. *Annu. Rev. Fluid Mech.* 55, 11–44.
- Charru, F. & Demuro, A. 2022 La mécanique des fluides à Toulouse durant la Seconde Guerre mondiale : entre opportunités et concurrences disciplinaires. In *Science et culture en temps de guerre (XIX^e-XX^e siècles)* (dir. C. Barrera & J. Cantier), p. 201–218. Portet-sur-Garonne : Éditions midi-pyrénéennes.
- Charru, F., dir. 2016 *L'Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse – 100 ans de recherches*. Paris : CNRS Éditions.
- Condette, J.-F. 2006 *Les recteurs d'académie en France de 1808 à 1940. Dictionnaire biographique*. Paris : INRP.
- Crausse, P. 2008 *L'eau des Pyrénées – Un siècle d'énergie hydroélectrique*. Toulouse : Cépaduès.
- d'Abzac-Epezy, C. 2016 L'industrie aéronautique française pendant la Seconde Guerre mondiale : histoire et communication historique. *Nacelles [En ligne], Pour une histoire sociale et culturelle de l'aéronautique au XX^e siècle*.
- Dalmasso, A. & Robert, E. 2007 Recherche et innovation dans l'industrie hydraulique : Neyrpic-Sogreah des années 1930 aux années 1960. *Annales historiques de l'électricité* 5 (1), 47–62.

- Darrigol, O. 1998 Aux confins de l'électrodynamique de Maxwell : ions et électrons vers 1897. *Revue d'histoire des sciences* **51** (1), 5–34.
- Darrigol, O. 2000 *Electrodynamics from Ampère to Einstein*. Oxford : Oxford University Press.
- Darrigol, O. 2005 *Worlds of flow. A history of hydrodynamics from the Bernoullis to Prandtl*. Oxford : Oxford University Press.
- Darrigol, O. 2023 La Société française de physique et la physique d'avant-garde (1890-1920). In *Les 150 ans de la Société Française de Physique - Panorama historique et scientifique*, p. 11–44. Paris : EDP Sciences & SFP.
- Daumas, M., dir. 1996 *Histoire générale des techniques (cinq tomes)*, 2^e éd. Paris : Presses universitaires de France.
- Davoust, E. 2000 *L'observatoire du pic du Midi - Cent ans de vie et de science en haute montagne*. Paris : CNRS Éditions.
- Demuro, A. 2017 Joseph Kampé de Fériet et la mécanique des fluides en France durant l'entre-deux-guerres. *C. R. Mécanique* **345**, 556–569.
- Demuro, A. 2018 *La mécanique des fluides durant l'entre-deux-guerres : J. Kampé de Fériet et l'IMFL*. Lille : Thèse de doctorat de l'université de Lille.
- d'Espagnat, B. 1980 *À la recherche du réel - Le regard d'un physicien*. Paris : Gauthier-Villars.
- Detrez, C. 1996 Les premiers développements du génie chimique à Toulouse. In « *Villes et institutions scientifiques* », rapport pour le PIR-Villes, CNRS (dir. M. Grossetti), p. 241–260.
- Devaux, O. 2020 Mort et renaissance de l'enseignement universitaire toulousain (1789-1870). In *Histoire de l'université de Toulouse (xiii^e-xxi^e siècles)*, vol. 3, ii (dir. C. Barrera), p. 11–43. Portet-sur-Garonne : Éditions midi-pyrénéennes.
- Duby, G., dir. 1970 *Histoire de la France*. Paris : Larousse.
- Duclert, V. & Chatriot, A., dir. 2003 *Quel avenir pour la recherche ?*. Paris : Flammarion.
- Durand, P. 2006 Émile Durand, créateur du campus de Rangueil et directeur de l'Institut de calcul numérique. Patrimoine scientifique et médical de l'université Paul Sabatier. Toulouse.
- Eckert, M. 2006 *The dawn of fluid dynamics – A discipline between science and technology*. Berlin : Wiley-VCH.
- Eckert, M. 2021 Pipe flow : a gateway to turbulence. *Archive for History of Exact Sciences* **75**, 249–282.
- Eckert, M. 2022 *Turbulence – an Odyssey. Origins and Evolution of a Research Field at the Interface of Science and Engineering*. Berlin : Springer.
- Emrich, R. J., Klebanoff, P. S., Elsasser, W. M. & Polachek, H. 1987 François N. Frenkiel. *Physics Today* **40**, 123–124.
- Escande, L. 1966 Notice nécrologique sur Charles Camichel, Membre non résidant. *C. R. Acad. Sc. Paris* **262** (8), 61.
- Fariñas del Cerro, L. 2015 Histoire de l'informatique à Toulouse : quelques repères. Communication à l'Académie des sciences, inscriptions et belles-lettres de Toulouse. Url : <https://www.academie-sciences-lettres-toulouse.fr/?p=6810>.
- Favre, A. 1981 Notice nécrologique sur Léopold Escande (1902-1980). *C. R. Acad. Sc. Paris* **292**, 139–143.

- Fert, C. 1954 Hommage à Henri Bouasse. *Annales de la Faculté des sciences de Toulouse, 4^e série* **18**, 1–3.
- Fontanon, C. 2005 Paul Painlevé et l'aviation : aux origines de l'étatisation de la recherche scientifique. In *Paul Painlevé (1863–1933). Un savant en politique* (dir. C. Fontanon & R. Frank), p. 41–56. Rennes : Presses Universitaires de Rennes.
- Fortrat, R. 1945a Louis Barbillion – 11 mai 1873 - 27 mars 1945. *Ann. de l'univ. de Grenoble* **21** (2), 21–25.
- Fortrat, R. 1945b René Gosse (1883-1943). *Ann. de l'univ. de Grenoble* **21** (2), 7–15.
- Fox, R. & Weisz, G., dir. 1980 *The organization of science and technology in France 1808-1914*. Paris : Cambridge University Press & Maison des Sciences de l'Homme.
- Gaste, P. 2016 Les archives aéronautiques et spatiales conservées aux Archives départementales de la Haute-Garonne. *Nacelles [En ligne], Pour une histoire sociale et culturelle de l'aéronautique au XX^e siècle*.
- Gaston-Breton, T. 2019 *Basil Zaharoff - L'incroyable histoire du plus grand marchand d'armes du monde*. Paris : Tallandier.
- Germain, P. 2006 *Mémoire d'un scientifique chrétien*. Paris : L'Harmattan.
- Ginoux, J.-M. 2017 *History of Nonlinear Oscillations Theory in France (1880–1940)*. Berlin : Springer.
- Gispert, H. 1994 Koenigs, Gabriel (1858-1931). Professeur de Mécanique (1923-1931). In *Les professeurs du Conservatoire national des arts et métiers – dictionnaire biographique 1794-1955. Tome 1* (dir. C. Fontanon & A. Grelon), p. 731–744. Paris : INRP-CNAM.
- Goldstein, S. 1969 Fluid mechanics in the first half of this century. *Annu. Rev. Fluid Mech.* **1**, 1–29.
- Grelon, A. 1989 Les universités et la formation des ingénieurs en France (1870-1914). *Formation Emploi* **27-28**, 65–88.
- Grelon, A. 1991a La formation des ingénieurs électriciens. In *Histoire générale de l'électricité en France, tome 1 (1881-1918)* (dir. F. Caron & F. Cardot), p. 254–292. Paris : Fayard.
- Grelon, A. 1991b La structuration du réseau de formation des ingénieurs électriciens. In *Histoire générale de l'électricité en France, tome 1 (1881-1918)* (dir. F. Caron & F. Cardot), p. 802–847. Paris : Fayard.
- Grelon, A. 1995 La formation des ingénieurs électriciens. In *Histoire générale de l'électricité en France, tome 2 (1919-1946)* (dir. M. Lévy-Leboyer & H. Morsel), p. 162–216. Paris : Fayard.
- Grelon, A. 1996a Lille : Kuhlman, Pasteur ou la science comme source de développement industriel. In « *Villes et institutions scientifiques* », rapport pour le PIR-Villes, CNRS (dir. M. Grossetti), p. 39–53.
- Grelon, A. 1996b Lille et la reconstruction difficile de l'enseignement supérieur local. In « *Villes et institutions scientifiques* », rapport pour le PIR-Villes, CNRS (dir. M. Grossetti), p. 189–195.
- Grelon, A. 1996c Lille, la concurrence entre catholiques et laïcs et le combat pour la suprématie régionale. In « *Villes et institutions scientifiques* », rapport pour le PIR-Villes, CNRS (dir. M. Grossetti), p. 99–114.
- Grelon, A. 1997 La brève existence de l'Institut électrotechnique de Lille. In *La naissance de l'ingénieur électricien - Origine et développement des formations nationales électrotechniques* (dir. L. Badel), p. 57–70. Association pour l'histoire de l'électricité en France & Presses Universitaires de France.

- Grelon, A. 2006 Les universités et la formation des ingénieurs électriciens : naissance d'une filière. In *Un siècle de formation des ingénieurs électriciens. Ancrage local et dynamique européenne, l'exemple de Nancy* (dir. F. Birck & A. Grelon), p. 3–21. Paris : Éd. de la Maison des sciences de l'homme.
- Grossetti, M. 1995 *Science, industrie et territoire*. Toulouse : Presses universitaires du Mirail.
- Grossetti, M., dir. 1996 « *Villes et institutions scientifiques* », rapport pour le PIR-Villes. Paris : CNRS.
- Grossetti, M. 1996a Toulouse : développement des sciences appliquées et décentralisations. In « *Villes et institutions scientifiques* », rapport pour le PIR-Villes, CNRS (dir. M. Grossetti), p. 304–311.
- Grossetti, M. 1996b Toulouse : les sciences écrasées par le droit. In « *Villes et institutions scientifiques* », rapport pour le PIR-Villes, CNRS (dir. M. Grossetti), p. 18–23.
- Grossetti, M. & Milard, B. 1996 Toulouse devient scientifique. In « *Villes et institutions scientifiques* », rapport pour le PIR-Villes, CNRS (dir. M. Grossetti), p. 136–156.
- Grossetti, M. & Milard, B. 1997 Une ville investit dans la science : genèse de l'Institut électrotechnique de Toulouse. In *La naissance de l'ingénieur électricien - Origine et développement des formations nationales électrotechniques* (dir. L. Badel), p. 133–148. Paris : Association pour l'histoire de l'électricité en France & Presses Universitaires de France.
- Grossetti, M. & Mounier-Kuhn, P.-E. 1995 Les débuts de l'informatique dans les universités - Un moment de la différenciation des pôles scientifiques français. *Revue française de Sociologie* XXXVI (2), 295–324.
- Grossetti, M. & Zuliani, J.-M. 2013 La construction d'un système industriel de haute technologie à Toulouse entre logiques locales et logiques nationales. In *Entreprises de hautes technologies. État et souveraineté depuis 1945* (dir. P. Fridenson & P. Griset), p. 267–281. Paris : Comité pour l'histoire économique et financière de la France.
- Guthleben, D. 2013 *Histoire du CNRS de 1939 à nos jours*. Paris : Armand Colin.
- Hager, W. H. 2009 *Hydraulicians in Europe – 1800-2000 (2 vol.)*. New York : CRC Press.
- Hager, W. H. 2016 SHF and Grenoble : La Houille Blanche, Beauvert laboratory and men. *La Houille Blanche* (5), 57–63.
- Hager, W. H. & Hahn, P. 2006 Ernest Hahn (1876-1948) et l'école polytechnique fédérale de Zurich. In *Un siècle de formation des ingénieurs électriciens. Ancrage local et dynamique européenne, l'exemple de Nancy* (dir. F. Birck & A. Grelon), p. 98–99. Paris : Éd. de la Maison des sciences de l'homme.
- Heilbron, J. L. 1979 *Electricity in the 17th and 18th centuries*. Berkeley : University of California Press.
- Heilbron, J. L. 2003 *Ernest Rutherford and the explosion of atoms*. Oxford : Oxford University Press.
- Hiriart-Urruty, J.-B. 2021a Robert Deltheil (1890-1972). Url : www.academie-sciences-lettres-toulouse.fr/?p=6810.
- Hiriart-Urruty, J.-B. 2021b Roger Huron (1913-1997). Url : www.academie-sciences-lettres-toulouse.fr/?p=6810.
- Hiriart-Urruty, J.-B. & Spiesser, M. 2021 Eugène Cosserat (1866-1932). Url : www.academie-sciences-lettres-toulouse.fr/?p=6810.
- Hunt, B. J. 2010 *Pursuing power and light - Technology and physics from James Watt to Albert Einstein*. Baltimore : The Johns Hopkins University Press.
- Idrac, M. 1996 Le développement difficile des instituts toulousains. In « *Villes et institutions scientifiques* », rapport pour le PIR-Villes, CNRS (dir. M. Grossetti), p. 215–233.

- Janet, P. 1909 La vie et les œuvres de E. Mascart. *Revue générale des Sciences pures et appliquées* **20**, 574–593.
- Kerisel, J. 2001 *Albert Caquot 1881-1976 – Savant, soldat et bâtisseur*. Paris : Presses de l'ENPC.
- König, W. 2006 L'instauration d'une nouvelle discipline académique : le génie électrique dans les *technische hochschulen* allemandes (1882-1914). In *Un siècle de formation des ingénieurs électriciens. Ancrage local et dynamique européenne, l'exemple de Nancy* (dir. F. Birck & A. Grelon), p. 387–403. Paris : Éd. de la Maison des sciences de l'homme.
- Lacoue-Labarthe, I. 2020 Femmes et bancs d'amphis, histoire d'une conquête, XIX^e-XXI^e siècle. In *Histoire de l'université de Toulouse (XIII^e-XXI^e siècles), vol. 3*, ii (dir. C. Barrera), p. 489–499. Portet-sur-Garonne : Éditions midi-pyrénéennes.
- Lamy, J. 2020 Les recherches scientifiques (XIX^e-XXI^e siècle). In *Histoire de l'université de Toulouse (XIII^e-XXI^e siècles), vol. 3*, iii (dir. C. Barrera), p. 407–431. Portet-sur-Garonne : Éditions midi-pyrénéennes.
- Lattes, A. 2019 *Paul Sabatier – Un chimiste visionnaire – 1854-1941*. Paris : Nouveau Monde éditions.
- Lelong, B. 1997 Paul Villard, J.-J. Thomson et la composition des rayons cathodiques. *Revue d'histoire des sciences* **50** (1-2), 89–130.
- Lelong, B. 2005 Ions, electrometers, and physical constants : Paul Langevin's laboratory work on gas discharges, 1896-1903. *Historical Studies in the Physical and Biological Sciences* **36**, 93–130.
- Lévy-Leboyer, M. 1995 Introduction générale. In *Histoire générale de l'électricité en France, tome 2 (1919-1946)* (dir. M. Lévy-Leboyer & H. Morsel), p. 11–26. Paris : Fayard.
- Lévy-Leboyer, M. & Morsel, H., dir. 1995 *Histoire générale de l'électricité en France - tome 2 (1919-1946)*. Paris : Fayard.
- Locqueneux, R. 2005 L'intérêt de l'histoire de la physique pour la formation des physiciens selon Henri Bouasse. *Revue d'histoire des sciences* **58** (2), 407–431.
- Moret, R. 1997 Cent ans d'enseignement de l'électricité à Grenoble. In *La naissance de l'ingénieur électricien - Origine et développement des formations nationales électrotechniques* (dir. L. Badel), p. 71–87. Paris : Association pour l'histoire de l'électricité en France & Presses Universitaires de France.
- Morsel, H. 1991a L'électricité dans l'économie générale du pays. In *Histoire générale de l'électricité en France, tome 1 (1881-1918)* (dir. F. Caron & F. Cardot), p. 505–550. Paris : Fayard.
- Morsel, H. 1991b L'hydroélectricité. In *Histoire générale de l'électricité en France, tome 1 (1881-1918)* (dir. F. Caron & F. Cardot), p. 594–670. Paris : Fayard.
- Mounier-Kuhn, P.-E. 2010 *L'informatique en France de la seconde guerre mondiale au Plan Calcul*. Paris : Presses de l'université Paris-Sorbonne.
- Nio, N. 2020 *Les théories électromagnétiques de l'éther : leur diffusion française, en particulier dans l'enseignement supérieur technique et les revues dédiées à l'électricité à la fin du XIX^e siècle*. Paris : Thèse de doctorat de l'université Paris-Sciences-Lettres.
- Nye, M.-J. 1986 *Science in the Provinces. Scientific Communities and Provincial Leadership in France, 1860-1930*. Los Angeles : University of California Press.
- Paul, H. W. 1985 *From knowledge to power - The rise of the science empire in France 1860-1939*. Cambridge : Cambridge University Press.

- Pestre, D. 1992 *Physique et physiciens en France, 1918–1940*, Paris éd. Éditions des Archives contemporaines, 2^e éd.
- Picard, J.-F. 1990 *La République des Savants - La Recherche française et le CNRS*. Paris : Flammarion.
- Picard, J.-F. 2022 La république des savants revisitée – Du CNRS à l'ANR, un siècle de recherche scientifique en France. Url : www.histcnrs.fr/RDS02.html.
- Prost, A. 1968 *Histoire de l'enseignement en France – 1800-1967*. Paris : Armand Colin.
- Prost, A. 1988 Les origines des politiques de la recherche en France (1939-1958). *Cahiers pour l'histoire du CNRS* (1), 41–62.
- Ramunni, G. 1991a La mise en place du système électrotechnique. In *Histoire générale de l'électricité en France, tome 1 (1881-1918)* (dir. F. Caron & F. Cardot), p. 308–326. Paris : Fayard.
- Ramunni, G. 1991b L'électromagnétisme de Coulomb à Gramme. In *Histoire générale de l'électricité en France, tome 1 (1881-1918)* (dir. F. Caron & F. Cardot), p. 54–115. Paris : Fayard.
- Ramunni, G. 1994 Deprez, Marcel (1843-1918). In *Les professeurs du Conservatoire national des arts et métiers – dictionnaire biographique 1794-1955. Tome 1* (dir. C. Fontanon & A. Grelon), p. 405–418. Paris : INRP-CNAM.
- Ramunni, G. 1995a *Les sciences physiques pour l'ingénieur. Histoire du rendez-vous des sciences et de la société*. Paris : CNRS Éditions.
- Ramunni, G. 1995b L'évolution scientifique et technique. In *Histoire générale de l'électricité en France, tome 2 (1919-1946)* (dir. M. Lévy-Leboyer & H. Morsel), p. 413–623. Paris : Fayard.
- Robert, E. 2001 *L'ingénieur moteur de l'innovation – un siècle de formation d'ingénieurs à Grenoble* (dir. R. Moret). Grenoble : Éditions des Vignes-l'Editeur-INPG.
- Rouse, H. 1976 Hydraulics' latest golden age. *Annu. Rev. Fluid Mech.* p. 1–12.
- Rouse, H. & Ince, S. 1957 *History of Hydraulics*. New York : Dover.
- Sauvage de Saint-Marc, G. 1961 Maurice Gariel et la recherche en hydraulique. *La Houille Blanche* (2), 118–123.
- Santon, L., dir. 1951 *Cérémonies du cinquantenaire de l'institut polytechnique de Grenoble*. Grenoble : Université de Grenoble.
- Segré, E. 1984 *Les physiciens modernes et leurs découvertes. Des rayons X aux quarks*. Paris : Fayard.
- Segré, E. 1987 *Les physiciens classiques et leurs découvertes. De la chute des corps aux ondes hertziennes*. Paris : Fayard.
- Shinn, T. 1979 The French science faculty system, 1808-1914 : Institutional change and research potential in mathematics and the physical sciences. *Historical Studies in the Physical Sciences* **10**, 271–332.
- Shinn, T. 1980 From 'corps' to 'profession' : the emergence and definition of industrial engineering in modern France. In *The organization of science and technology in France 1808-1914* (dir. R. Fox & G. Weisz). Paris : Cambridge Univ. Press & Maison des Sciences de l'Homme.
- Shinn, T. 1981 Des sciences industrielles aux sciences fondamentales. La mutation de l'École supérieure de physique et de chimie (1882-1970). *Revue française de sociologie* **22** (2), 167–182.
- Taalbi, J. & Nielsen, H. 2021 The role of energy infrastructure in shaping early adoption of electric and gasoline cars. *Nature Energy* **6**, 970–976.

- Taton, R. 1981 *Histoire Générale des Sciences. La science contemporaine (tome 3). I. Le XIX^e siècle*. Paris : PUF, 2^e éd.
- Viollet, P.-L. 2005 *Histoire de l'énergie hydraulique – Moulins, pompes, roues et turbines de l'Antiquité au XX^e siècle*. Paris : Presses de l'ENPC.
- Viollet, P.-L. 2017 From the water wheel to turbines and hydroelectricity. Technological evolution and revolutions. *C. R. Mécanique* **345**, 570–580.
- Weber, J.-M., dir. 2003 *Un demi-siècle d'aéronautique en France - Ouvrage introductif*. Paris : Comité pour l'histoire de l'aéronautique (ComAéro), Centre des hautes études de l'armement.
- Wesfreid, J. E. 2006 Scientific biography of Henri Bénard (1874–1939). In *Dynamics of Spatio-Temporal Cellular Structures. Henri Bénard Centenary Review* (dir. I. Mutabazi, J. E. Wesfreid & E. Guyon), p. 9–37. New York : Springer.
- Whittaker, E. 1951 *A history of the theories of aether and electricity - The classical theories*. Londres : Thomas Nelson and Sons Ltd.
- Whittaker, E. 1953 *A history of the theories of aether and electricity - The modern theories 1900-1926*. Londres : Thomas Nelson and Sons Ltd.

Index

A

Aigrain, Pierre, 303
Allievi, Lorenzo, 230, 232
Ampère, André-Marie, 8, 13, 17, 26
Andrau, M., 151, 152
André, Bernard, 343, 354
André, Roger, 339
Andrieux, Lucien, 90
Apollinaire, Guillaume, 1
Arago, François, 12, 13
Archdeacon, Ernest, 184
Archimède, force, 243
Arlaud, M., 132
Armand, Louis, 302
Astier, Placide, 2, 60
Atwood, machine, 243, 244
Auger, Pierre, 296
Avogadro, Amedeo, 41

B

Baillaud, Benjamin, 107
Baillaud, Jules, 198, 344
Bajon, J., 345
Barbe, Alain, 334
Barbillion, Louis, 86, 87, 88, 89, 90, 91
Baron, Charles, 63, 160
Baubiac, Jean, 152, 196, 197, 199, 200, 201, 209, 242, 243, 244, 245, 258, 259, 260, 273, 274, 279, 283, 284, 289, 290, 291, 292, 337, 351
Baudrand, H., 354
Bazin, déversoir, 175, 251
Bazin, Henri, 94, 324
Becquerel, Antoine, 27
Becquerel, Edmond, 6, 16, 26, 27
Becquerel, Henri, 24
Bedouce, Albert, 1, 116, 155, 165
Bedouce, Mlle, 151

Bell, téléphone, 7
Bénard, Henri, 172, 182, 189, 190, 229, 262, 263, 268, 269, 272, 326, 363, 365
Bénard-Kármán, tourbillons, 229, 259, 260, 262, 269, 279, 351
Bergeret, Jean, 214, 223, 224, 364
Berger, Gaston, 302
Bergès, Aristide, 33, 83, 84
Bergès, Georges, 158
Bernard, Claude, 22
Bernard, Jean, 303
Berthelot, Marcelin, 6, 41, 107, 108
Bertrand, Joseph, 28
Bichat, Ernest, 78, 79, 80, 81, 82
Birebent, Raymond, 310, 345, 346, 354
Blanc, Georges, 221, 265, 330, 352
Bloch, Marcel, 214
Blum, Léon, 65
Bohr, Niels, 40, 42
Boltzmann, Ludwig, 14, 41
Borel, Émile, 64, 96
Borel, M., 200
Bory, Charles, 212, 213, 326
Bouasse, Henri, 50, 51, 112, 115, 116, 119, 120, 121, 127, 128, 129, 136, 155
Boujon, Charles, 181, 351
Bouscasse, M., 151
Boussinesq, Joseph, 96, 236, 253, 326
Bouteille, Georges, 11, 153, 201, 335
Branly, Édouard, 20, 22, 27
Breguet, Antoine, 27
Breguet, école, 59, 192
Breguet, Louis François Clément, 59
Breguet, Louis (pionnier de l'aviation), 8, 212
Brenier, Casimir, 87, 88, 95
Breton, Jean-Louis, 63, 187, 364
Brillouin, Léon, 113
Brillouin, Marcel, 28, 42, 113, 236, 260, 357
Brunhes, Bernard, 58, 98, 99

Buhl, Adolphe, 125, 181, 182
 Burdin, Claude, 30

C

Caligny, Anatole de, 253
 Calmette, Joseph, 205
 Camichel, Charles, 1, 58, 67, 92, 99, 105, 112, 113, 125, 155, 174, 196, 205, 206, 217, 229, 309, 322, 357, 358, 363, 364
 Camichel, Henri, 154, 344, 364
 Capdecombe, Laurent, 300, 305, 310
 Capelle, Jean, 82, 83
 Capitant, René, 296
 Caquot, Albert, 188, 189, 190, 191, 193, 194, 195, 196, 197, 198, 202, 209, 210, 214
 Carnot, Sadi (homme politique), 106
 Cassagnol, Étienne, 353
 Castagnetto, Luis, 199, 273, 326, 351
 Castex, Louis, 199, 209, 224, 325, 333
 Cathala, Joseph, 307
 Cauchy, Augustin-Louis, 26
 Cavendish
 Henry, 11
 laboratoire, 25
 Cavour, Camillo, 33
 Chabbal, Robert, 304
 Chadwick, James, 40
 Charcot, Jean-Martin, 23
 Charliat, école, 59, 60
 Chaumat, Henri, 55
 Chevallier, Louis, 303
 Christofle, orfèverie, 4, 17, 18
 Claria, Albert, 325, 331, 333
 Claria, Jean, 325
 Clausius, Rudolf, 8, 14
 Cochery, Adolphe, 5, 53
 Comte, Auguste, 26
 Cosserat, Eugène, 198, 205
 Cotte, Jean, 339
 Cotton, Aimé, 63, 113
 Coulomb, Charles Augustin, 8, 11
 Coulon, Jean-Raoul, 345, 354
 Coyne, André, 35

Crausse, Étienne, 2, 32, 140, 152, 157, 158, 162, 168, 169, 170, 192, 197, 199, 201, 209, 258, 259, 260, 273, 274, 277, 278, 279, 280, 281, 282, 283, 284, 285, 286, 287, 288, 292, 293, 313, 314, 333, 337, 351
 Crookes, William, 23
 Curie, C., 340
 Curie, M., 345
 Curie, Marie, 25, 42, 364
 Curien, Hubert, 304
 Curie, Pierre, 25, 28, 54, 364

D

D'Alembert
 équation, 230
 Jean Le Rond, 228
 paradoxe, 228, 242
 Dalmayrac, Suzanne, 329, 352
 Danel, Pierre, 92, 93
 Dang, Phuoc Ly, 353
 Darrieus, Georges, 36, 37, 38, 210, 365
 D'Arsonval, Arsène, 21, 22, 27
 Dassault, Marcel, *voir* Bloch, 214
 Dat, Jean, 334, 348, 352
 Dausset, Jean, 302
 Dauzère, Camille, 198
 Davy, Humphry, 12, 13, 78
 De Broglie, Louis, 41, 308
 De Broglie, Maurice, 42
 De Forest, Lee, 44
 De Gaulle, Charles, 303, 325
 De Gennes, Pierre-Gilles, 129
 Dejean, Pierre, 91, 92
 Delmas, M., 311
 Deltheil, Robert, 151, 308, 309
 Denis-Gruson, balance, 203
 Denis, Maurice, 203
 Deprez, Marcel, 8, 22, 28, 29, 59, 84
 Descomps, David, 200
 Deutsch de la Meurthe, Henry, 184, 187
 Dewoitine
 avions, 203, 209, 210
 Émile, 190, 192

- Dirac, Paul, 41, 308
 Dottin, Paul, 322
 Doumergue, Gaston, 57
 Dovgolevsky, Valérien, 130
 Dubois, Georges, 208
 Dubois, Maurice, 217, 219
 Du Bois-Reymond, Emil, 22
 Duchenne de Boulogne, Guillaume, 21, 23
 Ducretet, Eugène, 21, 27
 Dufy, Raoul, 43
 Duhem, Pierre, 96, 128, 129
 Dumas, Jean-Baptiste, 6, 8, 9
 Du Moncel, Théodose, 4, 9, 27
 Dumont, E., 338
 Dumont, René, 303
 Dupin, Pierre, 152, 154, 181, 201, 209, 256, 259,
 260, 263, 264, 265, 266, 267, 268, 269, 270,
 272, 275, 276, 277, 310, 337, 344, 345, 346,
 351, 363
 Dupouy, Gaston, 45, 297, 298, 302, 305, 313, 325
 Dupuis, Pierre, 217
 Durand, Émile, 299, 301, 306, 307, 308, 312, 316,
 317, 318, 321
 Durante, C., 353
 Dürrbach, Félix, 205
- E**
- Edison, Thomas, 7, 16, 29, 34
 Eiffel
 Gustave, 57, 185, 186, 187
 laboratoires, 187, 203
 Einstein, Albert, 39, 40, 41, 42
 Ernaux, Annie, 295
 Escande, Léopold, 2, 112, 152, 172, 181, 193,
 196, 198, 199, 200, 201, 202, 209, 211, 212,
 213, 224, 225, 226, 237, 238, 240, 249, 252,
 255, 257, 310, 311, 312, 313, 315, 316, 318,
 320, 321, 322, 323, 324, 325, 326, 327, 328,
 330, 331, 332, 333, 334, 335, 336, 338, 339,
 341, 342, 344, 345, 348, 351, 361, 365
 Espagnol, M., 132, 150
 Estrade, Joachim, 29, 34, 159
- Euler
 équation, 286
 Leonhard, 228
 Eydoux, Denis, 92, 125, 136, 145, 162, 164, 165,
 170, 172, 181, 230, 231, 271, 351
 Eyrolles, Léon, 60
- F**
- Fabre, Charles, 111
 Fabre, Jean, 330
 Faiji, Mohamed Haidar, 338
 Faraday, Michael, 8, 12, 13, 14, 17, 129
 Farman, Henry, 184
 Favre, Alexandre, 213
 Favre-Artigues, Roger, 201, 344
 Ferrié, Gustave, 21
 Ferry, Jules, 98
 Feuga, Paul, 118
 Fizeau, Hippolyte, 26, 59
 Fleming, John A., 20, 44
 Florelle, Odette, 20
 Flusin, Georges, 87, 89, 90, 91
 Foch, Adrien, 93, 151, 171, 172, 181, 207, 231,
 351
 Fontaine, Hippolyte, 7, 18, 59
 Fortier, André, 93
 Foucault, Léon, 16, 18, 27, 59
 Fourier, Joseph, 26, 236
 Fourneyron, Benoît, 30, 31, 34
 France, Anatole, 47
 Francis, James B., 31, 34, 143, 165
 Frandon, P., 354
 Frenkiel, François Naftali, 213, 219, 220, 222
 Fresnel, Augustin, 26, 39
 Froude, William, 236
- G**
- Gachet, Paul, 22
 Galvani, Luigi, 11
 Gambetta, Léon, 98
 Gariel, Maurice, 92, 170, 230, 271
 Garrigues, M., 152

Gaulard, Lucien, 28
 Gerber, Sébastien, 327, 334, 352
 Germain, Paul, 303
 Gheusi, Joseph, 114, 115, 206
 Gibbs, John, 28
 Gibbs, Josiah Willard, 14
 Giono, Jean, 105, 227
 Giralt, Georges, 340, 344, 353
 Goblet, décret, 48
 Gosse, René, 87, 89, 91, 93
 Govi, Gilbert, 8
 Gramme
 dynamo, 17, 18, 22
 Zénobe, 18
 Grateloup, G., 353
 Gray, Henri, 163
 Grignard, Victor, 108
 Gruat, Jean, 334, 348, 352
 Gruson, Frédéric, 203
 Guével, Pierre, 330, 334, 352
 Guillemet, Henri, 221
 Gumowski, Igor, 353

H

Haegelen, Alfred, 93
 Hahn, Ernest, 80, 82, 182
 Haller, Albin, 52, 54, 78, 79, 81
 Heaviside, Oliver, 15
 Heisenberg, Werner, 41
 Helmholtz
 Hermann von, 8, 11, 14, 22, 236, 261, 309
 surfaces de discontinuité, 242, 260, 261, 263, 279
 Hérault, Paul, 83
 Hertz, Heinrich, 11, 14, 20, 34, 38, 39, 45, 159
 Herz, Cornélius, 4
 Hoffmann, J.-C., 345, 354
 Hospitalier, Édouard, 53, 54
 Hugo, Victor, 183
 Huguenard, Eugène, 259
 Huron, Roger, 305, 309

J

Jablochhoff, Paul, 7, 16, 27
 Jacob, François, 302
 Jacobi, Moritz von, 6
 Jamin, Jules, 6, 18, 27
 Jammes, Léon, 111
 Janet, Paul (philosophe), 56
 Janet, Paul (physicien), 9, 10, 54, 56, 57, 84, 85
 Jaurès, Jean, 106, 116
 Joliot-Curie, Irène, 65, 301
 Jossierand, P., 345
 Jouane, Léon, 124, 132, 151
 Jouane, Mlle, 152
 Jouguet, Émile, 32, 181, 182, 236, 365
 Joukovski, Nicolai, 230, 262
 Joule
 effet, 18, 29, 258
 James, 41
 Juppont, Pierre, 118

K

Kampé de Fériet, Joseph, 182, 191, 208, 215, 216, 218, 219, 220, 221, 222, 223, 224, 229
 Kaplan, Viktor, 31
 Kármán, Theodore von, 216, 219, 228, 262, 263, 268, 269, 289, 293, 365
 Kastler, Alfred, 302
 Kelvin-Helmholtz, tourbillons, 279, 283, 294
 Kirchhoff, Gustav, 8
 Kœnigs, Gabriel, 64, 72
 Kravtchenko, Julien, 93
 Kuhlmann, Frédéric, 95, 98
 Kuntzmann, Jean, 308

L

Lacoste, Robert, 339, 340, 341, 344, 353
 Lacroix, G., 210
 Lagasse, Jean, 305, 309, 310, 316, 317, 318, 319, 339, 340, 341, 342, 343, 344, 352
 Lalangue, Pierre, 338, 353

- Lamb, Horace, 236, 244
 Landucci, Jean, 302
 Langevin, Paul, 28, 42, 54, 62, 150, 296
 Langevin-Wallon, plan, 296, 297, 347
 Laplace, force, 19
 Laplace, Pierre-Simon de, 11, 26
 Lapresle, Antonin, 186, 208, 210
 Lasserre, Y., 340
 Latarjet, Raymond, 303
 Latécoère, Pierre-Georges, 191, 192, 198, 199, 203, 210, 212, 332
 Laudet, Michel, 316, 317
 Laurent-Eynac, André, 185, 188
 Lauth, Charles, 54
 Lautré, M., 132
 Laval, Pierre, 214
 Lay, Roger, 339
 Lebrun, Albert, 66
 Le Chatelier, Henry, 75
 Leclanché, Georges, 53
 Leclerc du Sablon, Jean, 162
 Leclerc du Sablon, Mathieu, 107, 109, 162
 Lecocq, P., 330, 352
 Ledoux, Charles, 181, 351
 Lefevvre, Serge, 345, 354
 Le Gourières, Désiré, 334, 352
 Lenard, Philipp, 24
 Le Rolland, Paul, 296
 Leroux, Paul, 95
 Letort, Maurice, 302, 303
 Levi-Civita, Tullio, 113, 182, 242, 260
 Lhomme, Jean, 201
 Liard, Louis, 48, 86, 106
 Lichnerowitz, André, 303
 Lippmann, Gabriel, 27, 87
 Longchambon, Henri, 66, 206, 299, 300, 301, 302
 Lorentz, Hendrick Antoon, 24, 39
- M**
- Mach, Ernst, 8, 41
 Magnan, Antoine, 259
 Malavard, Lucien, 66, 221, 229
 Malvazio, Mlle, 311
 Marchis, Lucien, 187
 Marconi, Guglielmo, 21
 Marey, Étienne-Jules, 22, 253, 254
 Marreckchi, A., 354
 Martin, Jean-Claude, 23, 343, 354
 Martinot, H., 353
 Martinot-Lagarde, André, 191, 215, 216, 219, 221, 223
 Marty, Max, 340, 353
 Masbernat, Lucien, 330
 Mascart, Éleuthère, 6, 10, 54, 56, 57, 127
 Massé, Pierre, 303
 Matheau, J.-C., 345, 354
 Mauduit, Alexandre, 80, 82
 Maurain, Charles, 56, 187
 Mauret, Joseph, 338
 Maxwell, James Clerk, 11, 13, 14, 38, 39, 41
 Mendès-France, Pierre, 299, 301, 302, 303
 Mermoz, Jean, 192
 Mézencev, Romane, 340, 353
 Michelson-Morley, expérience, 39
 Mignonac, Georges, 219
 Minkowsky, Hermann, 39
 Mira, Christian, 341, 353
 Monier, R., 339
 Monnet, plan, 301
 Monod, Jacques, 302
 Montefiore, Institut, 55, 58, 79
 Morelière, R., 346
 Morse
 code, 15, 21, 258
 Samuel, 15
 Moulun, Georges, 159, 160
- N**
- Navier-Stokes, équations, 236
 Nègre, Florentin, 151, 152
 Newton, Isaac, 11, 13
 Nougaro, Jean, 199, 211, 310, 325, 326, 334, 336, 348, 352
 Novo, Darcy Domingues, 343, 354
 Nui-Ai, 353

O

Ersted, Hans Christian, 12, 13
 Ohm, Georg Simon, 8
 Oiknine, Claude, 330, 352
 Ostwald, Wilhelm, 41
 Otsubo, Kikuro, 172

P

Pacinotti, Antonio, 17, 18
 Paindavoine, R., 338
 Painlevé, Paul, 62, 64, 96, 171, 184, 187, 188, 231, 363
 Paloque, Émile, 198, 218
 Parville, Henri de, 4, 8
 Pasteur
 Institut, 62
 Louis, 52, 95, 96, 100, 110
 Pauli, Wolfgang, 41
 Paul, Jean-Raoul, 161
 Pelton
 Lester A., 31
 turbines, 143, 160
 Pérès, Jeanne, 172
 Pérès, Joseph, 66, 151, 172, 207, 229
 Perreau, François, 80
 Perriard, Edmond, 201
 Perrin, Jean, 24, 41, 42, 65, 301, 324
 Perroud, Claude-Marie, 106, 107, 115, 119, 120, 121, 155
 Pham, Huu Hiep, 353
 Pham, Van Vui, 353
 Picard, Émile, 66, 207, 300, 301, 303, 304, 305, 334
 Piganiol, Pierre, 303
 Pionchon, Joseph, 85, 86, 87, 91
 Piquemal, Jean, 333, 334, 348, 352
 Pitot, tube, 186, 253, 259
 Pixii, Hippolyte, 6, 17
 Planck, Max, 39, 40
 Planiol, André, 259
 Planté, Gaston, 16
 Poincaré, Henri, 14, 28, 39, 42, 185

Poincaré, Léon, 220, 221
 Poincaré, Raymond, 61
 Poiseuille, écoulement, 265, 284, 285
 Poisson, Siméon-Denis, 11, 26
 Poncelet, Jean-Victor, 30
 Ponte, Maurice, 302, 303
 Popov, Alexandre, 21
 Potez, Henri, 215, 216
 Pottevin, Henri, 67, 69, 70, 71
 Prandtl
 couche limite, 187, 228, 242, 261
 Ludwig, 187, 228, 242, 289, 293
 Privat, Édouard, 113, 118, 325
 Proust, Marcel, 77
 Prudon, Georges, 92
 Prunet, Alphonse, 110, 111, 131

R

Raoult, François, 84, 90
 Raoult, J.-C., 353
 Rateau, Auguste, 31, 32, 92, 365
 Raulin, Jules, 52
 Rayleigh-Bénard, thermoconvection, 229
 Rayleigh, Lord (John William Strutt), 129, 236, 263, 270, 275, 283
 Reech, Ferdinand, 236
 Reech-Froude, similitude, 238, 241
 Regnault, Victor, 10, 27
 Reille, Amédée, 160
 Rey, Joseph, 151
 Reynolds
 nombre, 228, 236, 238, 239, 240, 241, 243, 246, 247, 248, 255, 256, 259, 265, 268, 269, 270, 271, 274, 275, 285, 288, 289, 290, 291, 292
 Osborne, 236, 289
 similitude, 263, 267, 282, 283, 284, 285, 291
 Riabouchinsky, Dimitri, 187, 188, 189, 270, 275
 Ricaud, Marcel, 152, 238, 261
 Richardson, E. G., 263, 270, 275
 Rieu, Raymond, 193, 197, 199, 201
 Rith, Léon, 186

Rocard, Yves, 17, 18, 19, 37, 44, 66, 328, 364
 Röntgen, Wilhelm, 24
 Roud, Gustave, 157
 Roule, Louis, 111
 Routin, Georges, 87, 92, 95
 Roy, Louis, 196, 197
 Ruhmkorff, bobine, 14
 Russell, John Scott, 253
 Rutherford, Ernest, 25, 26, 40

S

Sabathé, Georges, 199, 200, 209
 Sabathé, Marcel, 201
 Sabatier, Paul, vii, 1, 107, 108, 109, 111, 112, 113, 116, 117, 118, 120, 122, 125, 130, 131, 132, 146, 148, 149, 152, 155, 205, 307, 335, 348
 Sadron, Charles, 293, 303
 Saint-Exupéry, Antoine de, 192
 Salva, M., 201
 Sananès, Fabien, 333, 334, 352
 Santon, Lucien, 83, 93
 Schneider, Charles, 59
 Schrödinger, Erwin, 41
 Schuster, Arthur, 24
 Schwarz-Christoffel, transformation, 330
 Seguin, inspecteur général de l'Aéronautique, 189, 192
 Senderens, Jean-Baptiste, 108
 Serny, Jean, 345
 Sévely, Yves, 340, 341, 344, 352
 Siemens, Werner, 8, 9, 17, 18, 19, 45
 Sirven, Joseph, 106, 159, 175, 176
 Soddy, Frederick, 25, 40
 Solvay
 congrès, 42
 Ernest, 42, 79, 81, 82
 Sommerfeld, Arnold, 40
 Stokes
 George Gabriel, 129
 théorème, 257
 Strouhal, nombre, 263, 268, 269, 270, 272
 Strouhal, Vincenc, 263

Sudria, école, 59, 60
 Surchamp, Y., 340, 353
 Swan, Joseph, 16
 Swyngedauw, René, 100, 101, 102, 103

T

Taranger, Pierre, 303
 Taylor, Geoffrey I., 216, 228, 365
 Teissier, Georges, 296
 Teissié-Solier, Max, 152, 181, 201, 209, 260, 263, 264, 267, 268, 269, 270, 271, 272, 273, 275, 276, 309, 310, 319, 337, 338, 339, 340, 341, 345, 351
 Terradas, Esteve, 208
 Tesla, Nikola, 18, 19, 29, 34
 Thirriot, Claude, 316, 317, 334, 352
 Thomson, James, 32
 Thomson, Joseph John, 24
 Thomson, William (Lord Kelvin), 8, 11, 15, 26, 32
 Tissot, Camille, 21
 Toussaint, Albert, 187
 Trannoy, Bernard, 353
 Trombe, Félix, 303
 Truchasson, Christian, 330, 334, 352

V

Valroger, Pierre de, 208
 Van der Pol, équation, 273
 Van Gogh, Vincent, 22
 Vauquelin, Louis-Nicolas, 95
 Verne, Jules, 3
 Vidal, Louis, 90
 Vidal, P., 353
 Villard, Paul, 25
 Villat, Henri, 113, 188, 189, 207, 309, 363, 365
 Villey, Jean, 189, 190, 196, 207
 Violet, école, 10, 59
 Vogt, Henri, 80, 82
 Voisin, Charles et Gabriel, 31, 33, 157, 184, 248, 268, 274, 290, 292
 Volta, Alessandro, 8, 10, 11, 12, 16, 18, 21

W

Wallon, Henri, 296, 297, 347
Wehrlé, Philippe, 215
Weil, Simone, 227
Westinghouse, George, 29, 34
Wheatstone, Charles, 15, 337
Wiechert, Emil, 24
Witz, Aimé, 60
Witz, chanoine, 60
Wright, Orville et Wilbur, 184

Y

Yviquel, Jacques, 339

Z

Zadeh, Morched, 154
Zaharoff, Basil, 2, 187, 364
Zay, Jean, 66
Zeeman, Pieter, 23, 24
Ziai, Abdul Azim, 338