

B. Belhoste et K. Chatzis

## **L'enseignement de la mécanique appliquée en France au début du XX<sup>e</sup> siècle**

(publié dans Claudine Fontanon (dir.), *Histoire de la mécanique appliquée. Enseignement, recherche et pratiques mécaniciennes en France après 1880*, Cahiers d'Histoire et de Philosophie des Sciences, n° 46, 1998, pp. 29-46)

En dépit de son importance, l'histoire de la mécanique appliquée et de son enseignement au XIX<sup>e</sup> et XX<sup>e</sup> siècle est restée assez peu étudiée. Sans prétendre évidemment combler cette lacune, nous voudrions ici donner, pour le cas français et autour de 1900, une première vue d'ensemble sur l'enseignement de cette discipline située à la frontière du monde académique et du monde industriel. Nous le ferons en esquissant à la fois les grands traits de son organisation (lieux d'enseignement, publics concernés, corps enseignant) et la nature de ses contenus (relation avec la théorie, style d'exposition, domaines d'application).

Au tout début du siècle, la mécanique reste la science-reine, malgré les succès éclatants de théories physiques nouvelles qui se sont libérées du modèle mécaniste, comme la thermodynamique et l'électromagnétisme, et de leurs applications industrielles. Dans l'introduction de son cours de mécanique à l'École polytechnique, en 1908, Lecornu explique encore que la mécanique tend à comprendre la totalité des sciences physiques : "Effectivement, écrit-il, la physique, la chimie, la biologie même, à mesure qu'elles se perfectionnent, élargissent le domaine de la mécanique proprement dite, en ramenant l'explication des phénomènes observés aux lois générales de l'équilibre et du mouvement"<sup>1</sup>. La mécanique se distingue cependant fondamentalement par ses méthodes des sciences physiques. Alors que ces dernières sont basées sur l'étude expérimentale des phénomènes naturels, la mécanique considère des schématisations matérielles ou abstraites qui sont le fruit de l'esprit humain. Matérielles, celles-ci se réalisent sous forme de divers artefacts, outils, machines, etc., que les hommes utilisent pour agir et opérer sur le monde qui les entourent. Abstraites, elles constituent des modélisations susceptibles d'être entièrement mathématisées.

Ce dernier caractère explique l'importance scientifique de la mécanique du XIX<sup>e</sup> siècle : celle-ci constitue le paradigme d'une science entièrement mathématisée. Pour Auguste Comte, par exemple, elle appartient à la mathématique concrète, c'est-à-dire à la science par excellence. D'un autre côté, son importance tient à l'étendue de ses applications : applications

---

<sup>1</sup> L. Lecornu, *Cours de mécanique et machines à l'École polytechnique*, 2e division, lithographie, 1908-1909, Paris, chapitre 1 : définition et portée de la mécanique.

aux sciences de la nature d'abord, particulièrement à l'astronomie où elle connaît ses plus remarquables succès ; applications industrielles aussi, dont l'ensemble forme ce qu'on appelle en général la mécanique appliquée, ou mécanique industrielle, et qui se développe de manière extraordinaire au XIX<sup>e</sup> siècle.

Ce développement de la mécanique appliquée s'inscrit lui-même dans un mouvement général d'innovations techniques. L'invention et le perfectionnement de la machine à vapeur et de la turbine accompagnent la première étape de la révolution industrielle. Ce qu'on appelle parfois la seconde révolution industrielle, à partir des années 1880, marque une mutation profonde des grands systèmes techniques. Les rapports entre sciences et techniques s'approfondissent. En particulier, les sciences appliquées jouent un rôle de plus en plus important dans le processus d'innovation technique. Même si cette mutation concerne principalement la chimie et la science électrique, la mécanique est elle aussi affectée, avec la multiplication des machines-outils, le développement de l'industrie automobile, l'invention de l'aviation et le développement de l'électrotechnique par exemple. Au début du XX<sup>e</sup> siècle, la mécanique reste encore la “bonne à tout faire” de l'industrie.

### **Origines et caractères de la mécanique appliquée en France**

Tout corps de savoir traverse une longue préhistoire au cours de laquelle des auteurs très divers, aux prises avec des problèmes spécifiques, travaillant sur des secteurs de réalité hétérogènes et disparates et agissant sans plan d'ensemble préconçu, délimitent progressivement un domaine de pratiques et de connaissances avant qu'il ne soit dûment identifié, institutionnalisé et systématisé. La mécanique appliquée, telle qu'elle se développe en France, n'y fait pas exception. Ses origines remontent au XVII<sup>e</sup> siècle voire au-delà, mais c'est seulement à partir de la fin du XVIII<sup>e</sup> siècle qu'elle se constitue progressivement en discipline distincte et unifiée. La contribution d'ingénieurs-savants formés avant la Révolution à l'École des ponts et chaussées et surtout à celle du génie — citons, entre autres, Du Buat, Chezy, Coulomb, Borda, Lazare Carnot — dans une série de domaines tels que l'écoulement des fluides, la résistance des matériaux, les moteurs (surtout hydrauliques), les mécanismes, a joué un rôle déterminant dans ce processus, qui s'accélère avec la mise en place pendant la Révolution d'un système d'enseignement scientifique et technique autour de l'École polytechnique. La mécanique appliquée s'affirme alors comme un champ disciplinaire autonome enseigné dans les écoles d'application.

Dans la première moitié du XIX<sup>e</sup> siècle, l'approche descriptive de la science des machines, représentée entre autres par Dupin, Poncelet et Chasles, donne naissance à la cinématique appliquée, qui traite les machines du point de vue de la transmission du mouvement (mécanismes), et l'approche dynamique, représentée par Navier, Poncelet, Coriolis, à la

mécanique industrielle fondée sur l'étude des forces et la considération des forces vives. Les machines y sont systématiquement étudiées du point de vue de la transmission du travail mécanique. Parallèlement, l'hydraulique et la résistance des matériaux se dotent de bases solides, avec les progrès de l'hydrodynamique et la création de la théorie de l'élasticité. Enfin, la constitution d'un cadre théorique pour la mécanique appliquée permet le développement d'une mécanique expérimentale dont le but est moins de donner à la théorie une base empirique que de justifier les simplifications des modèles en vue des applications pratiques.

À partir du milieu du XIX<sup>e</sup> siècle, on peut dire que la mécanique appliquée s'est constituée en un corps de doctrine, organisé autour de cinq thèmes majeurs et décliné en fonction du public visé : la cinématique appliquée ou théorie des mécanismes ; l'étude des résistances passives et leur prise en compte dans les machines en équilibre et en mouvement ; la résistance des matériaux ; l'hydraulique et les moteurs hydrauliques ; les moteurs thermiques<sup>2</sup>. Les perfectionnements introduits dans la suite n'en modifieront pas les lignes essentielles.

Pourvue d'une organisation interne, visible par exemple dans les structures d'enseignement et les traités, la mécanique appliquée à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle a donc acquis une identité forte. En tant que science mécanique, elle entretient aux yeux des contemporains des rapports étroits avec la mécanique rationnelle (dite également mécanique générale ou mécanique théorique) ; en tant qu'appliquée, elle s'en différencie. «La Mécanique rationnelle, écrit H. Léauté, est une science exacte qui considère non les corps de la nature mais certains êtres fictifs qui peuvent être regardés comme des limites et qui sont susceptibles de définitions mathématiques»<sup>3</sup>. Cette définition classique permet de mesurer la distance qui sépare la mécanique rationnelle de la mécanique appliquée. La première s'intéresse en effet à des «corps fictifs», nommés aussi des «êtres de raison» et se présente comme une «science de raisonnement» qui déploie ses résultats à partir d'un nombre réduit de principes de base (hypothèses) et en faisant appel aux seules ressources du raisonnement mathématique. Elle traite principalement des solides indéformables (invariables) et des fluides parfaits, même si la théorie de l'élasticité en fait également partie. La façon dont un phénomène tel que le frottement est appréhendé est significative de la conception que l'on se fait alors de la mécanique rationnelle en tant que science de raisonnement pur. Indiquant comment les « corps naturels » sont assimilés à des points matériels ou à des solides indéformables, H. Léauté précise ainsi «qu'il arrive même, comme dans le cas du frottement, que des assimilations de ce genre deviennent impossibles ; on se trouve alors conduit à des *hypothèses spéciales qui semblent sortir du cadre de la*

---

<sup>2</sup> Ch. Combes, Ed. Phillips et Ed. Collignon, *Exposé de la situation de la Mécanique Appliquée* (Recueil de Rapports sur les progrès des Lettres et des sciences en France), Paris, Imprimerie Impériale, 1867.

<sup>3</sup> H. Léauté, *Cours de mécanique professé à l'École Polytechnique, 2ème div. 1897-1898*, Paris, 1898 (lith.), p. 2.

*Mécanique rationnelle et viennent rompre l'harmonie de ses formules (c'est nous qui soulignons)*<sup>4</sup>.

La mécanique appliquée, en revanche, en s'intéressant aux « corps naturels », c'est-à-dire à des objets que l'on rencontre dans des situations pratiques, essaie d'intégrer dans les modélisations mathématiques qu'elle propose plusieurs données provenant de l'expérience. Aux équations de la mécanique rationnelle, souvent impossibles à résoudre (surtout en Hydrodynamique et en Élasticité) et en général trop compliquées eu égard aux besoins de la pratique, elle substitue des équations simplifiées, produits d'hypothèses auxiliaires contenant des coefficients déterminés empiriquement. Mais si la mécanique appliquée met en jeu des équations moins sophistiquées que la mécanique rationnelle, elle n'en garde pas moins le caractère dominant de science mathématique, ce qui la distingue nettement de la technologie mécanique, « science qui a pour objet l'histoire et la description des procédés industriels »<sup>5</sup>.

Telle qu'elle existe à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle, la mécanique appliquée apparaît comme le fruit d'une double pratique : d'une part, une pratique technique, car tous les ingénieurs-savants qui ont contribué à son développement, ont une activité sur le terrain (d'où des problèmes pratiques concernant les moteurs hydrauliques, les moteurs à vapeur, les matériaux de construction, les équipements, etc.) ; d'autre part, une pratique pédagogique, car tous ces ingénieurs sont aussi des professeurs, qui ont dû adapter leur enseignement aux publics très divers auxquels ils s'adressaient. Sont concernés en effet par la mécanique appliquée non seulement des ingénieurs au fait des principes de la mécanique rationnelle et rompus au calcul différentiel et intégral, mais aussi toute une population de petits industriels, de contremaîtres et de chefs d'atelier, voire d'ouvriers, directement au contact des machines et des moteurs. La mécanique appliquée sort ainsi rapidement des grandes écoles afin de rencontrer « l'armée du travail » : instance de médiation entre un savoir pur, celui de la mécanique rationnelle, et les besoins de la société, elle porte dès cette époque, et peut-être plus que n'importe quelle autre discipline scientifique, une espérance collective qu'elle véhicule encore à l'aube du XX<sup>e</sup> siècle.

### **La mécanique appliquée dans les institutions d'enseignement en 1900**

Compte tenu de cette dualité, on peut distinguer dans l'histoire de l'enseignement de la mécanique appliquée en France deux grandes traditions. La première est liée intimement à la mécanique rationnelle. Elle prend naissance à l'École polytechnique et dans ses écoles

---

<sup>4</sup> *Ibid.*, p. 204.

<sup>5</sup> A. Garry, *Cours élémentaire de technologie mécanique professé à l'École municipale Diderot de la ville de Paris*, t. 2, Paris, impr. de C. Renaudie, 1902, p. 7.

d'application dans les années 1820-1830. Les noms de Navier, qui enseigne à l'École des ponts et chaussées, et de Poncelet, qui enseigne à l'École d'artillerie et du génie de Metz, lui sont associés<sup>6</sup>. Elle est toujours très vivante au début du XX<sup>e</sup> siècle, tant à l'École polytechnique et ses écoles d'application, qu'à l'École centrale des arts et manufactures et dans les nouveaux instituts universitaires. La seconde tradition fait beaucoup moins recours aux théories mathématisées et s'appuie sur des modèles concrets. Elle a pris naissance au Conservatoire des arts et métiers (CNAM) avec Dupin au début des années 1820, mais c'est Poncelet qui, là encore, donne l'impulsion décisive grâce à son cours aux ouvriers messins diffusé sous la Monarchie de Juillet<sup>7</sup>. À la fin du XIX<sup>e</sup> siècle, cette tradition s'est beaucoup diversifiée. Elle s'épanouit dans l'enseignement professionnel qui connaît alors une rapide expansion. En revanche, un enseignement de mécanique appliquée tournée vers la pratique mais plus théorique s'est développé au CNAM ainsi que dans les écoles d'arts et métiers et les écoles d'ingénieurs équivalentes, à mesure que s'y élevait le niveau de formation.

Les considérations précédentes sur l'évolution de la mécanique appliquée en France au XIX<sup>e</sup> siècle nous permettent de mieux comprendre l'organisation institutionnelle de son enseignement au début de notre siècle<sup>8</sup>. On enseigne la mécanique appliquée du haut en bas du système de formation technique : les mêmes objets y sont étudiés avec le même point de vue, mais selon des méthodes différentes impliquant de grandes différences quant à l'emploi des mathématiques et au recours à l'expérience pratique.

Au niveau inférieur, il existe un enseignement de mécanique dans la plupart des écoles professionnelles, tant spécialisées comme l'École des mécaniciens de la flotte de Lorient ou l'École d'horlogerie de Paris (fondée en 1880) que généralistes comme l'École Diderot, les écoles nationales professionnelles, les écoles professionnelles du commerce et de l'industrie (EPCI) et les sections industrielles d'écoles primaires supérieures (EPS) (cours de mécanique en 3<sup>e</sup> année). Il faudrait ajouter à cette liste les nombreux cours professionnels, par exemple

---

<sup>6</sup> Sur le cours de Poncelet à Metz, voir K. Chatzis, "Jean-Victor Poncelet et la science des machines à l'École de Metz : 1825-1870", dans B. Belhoste et A. Picon (dir.), *L'École de l'Artillerie et du Génie de Metz, 1802-1870* (à paraître). Sur l'enseignement de Navier à l'École des ponts et chaussées, voir A. Picon, *L'invention de l'ingénieur moderne. L'École des ponts et chaussées, 1747-1851*, Paris, Presses de l'ENPC, 1992, pp. 482-495.

<sup>7</sup> J.-V. Poncelet, *Cours de mécanique industrielle, fait aux artistes et ouvriers messins : 1<sup>ère</sup> partie-1827-28 ; 2<sup>ème</sup> partie-1828/29 ; 3<sup>ème</sup> partie-1821*, Metz (lith.) ; réédité par les soins de X. Kretz sous le titre : *Introduction à la mécanique industrielle physique ou expérimentale*, Paris, Gauthiers-Villars, 1870).

<sup>8</sup> Voir Th. Charmasson, A.-M. Lelorrain et Y. Ripa, *L'Enseignement technique de la Révolution à nos jours*, textes officiels avec introduction, notes et annexes, tome 1 : 1789-1926, Paris, Paris, INRP et Economica, 1987, et Ministère du Commerce, de l'Industrie des Postes et des Télégraphes, Direction de l'enseignement technique du personnel et de la comptabilité, *L'enseignement technique en France*, Étude publiée à l'occasion de l'exposition de 1900, tome 4 : Établissement divers d'enseignement technique, Paris, Imprimerie Nationale, 1900.

les cours de chauffeurs-mécaniciens<sup>9</sup>, plus directement tournés vers la pratique professionnelle et d'un niveau plus élémentaire, mais qui comprennent également un enseignement modeste de type théorique.

Il est difficile, dans l'état actuel de nos connaissances, d'établir un tableau précis de l'enseignement de mécanique donné dans ces formations professionnelles. Le modèle du cours, tel qu'il se dégage de l'examen d'un certain nombre de manuels et de programmes, est celui développé par Poncelet et Morin dans le cadre de la "tradition pratique", avec probablement des différences suivant le niveau des établissements. Les mathématiques utilisées s'y réduisent à l'arithmétique, l'algèbre et la géométrie élémentaires<sup>10</sup>. Un des traits fondamentaux de ces formations professionnelles est l'importance accordée au travail manuel en atelier. À cet égard, la fin du XIXe siècle marque une mutation importante, avec l'équipement des ateliers d'école en machines-outils<sup>11</sup>. Les élèves ne se contentent plus de s'initier au travail sur ces machines, ils étudient leur fonctionnement *in situ*, en les démontant et en dessinant les pièces. Cette transformation de l'atelier, que l'on retrouve d'ailleurs dans les établissements scolaires d'un niveau plus élevé, ouvre la voie à un renouvellement de la pédagogie par une association plus étroite du travail pratique avec l'enseignement théorique.

Au niveau moyen, la mécanique appliquée est, à côté du dessin industriel, l'un des enseignements de base des Écoles nationales d'arts et métiers (ENAM)<sup>12</sup>. Créées à l'origine pour former des ouvriers professionnels, les ENAM, qui recrutent des élèves au sortir de l'enseignement primaire supérieur et de l'enseignement professionnel (EPCI), délivrent à partir de 1907 un diplôme d'ingénieur. Cette transformation s'accompagne dès le milieu des années 1880 d'une très sensible élévation du niveau d'enseignement<sup>13</sup>. On peut assimiler aux ENAM d'autres écoles généralistes, associant formation théorique et formation pratique, comme l'Institut industriel du Nord de la France, à Lille, et l'École centrale lyonnaise, où

---

<sup>9</sup> Voir Ph. Marchand, "Une expérience de formation professionnelle d'adultes, le cours municipal des chauffeurs-mécaniciens de Lille, 1858-1939", in G. Bodé et Ph. Savoie, *L'offre locale d'enseignement, les formations techniques et intermédiaires, XIXe-XXe siècles, Histoire de l'éducation*, n° 66, mai 1995, pp. 137-158.

<sup>10</sup> Voir par exemple E. Gouard et G. Hiernaux, *Cours élémentaire de mécanique industrielle, principes généraux, applications, exercices pratiques* (à l'usage des Écoles pratiques de Commerce et d'industrie, des Écoles nationales professionnelles, des Écoles des mécaniciens de la marine, etc....), 3 vol., Paris, H. Dunod et E. Pinat, 1910.

<sup>11</sup> Voir Y. Legoux, *Du Compagnon au technicien. L'École Diderot et l'évolution des qualifications, 1873-1972*, Paris, 1972, et Ph. Savoie, "Offre locale et engagement de l'État. Les enseignements technique et primaire supérieur à Nanchy et les conditions de leur évolution sous la Troisième République", in G. Bodé et Ph. Savoie, op. cit., pp. 47-83.

<sup>12</sup> Il existe en 1914 six ENAM, à Aix-en-Provence, Angers, Châlons-sur-Marne, Cluny, Lille et Paris, dont trois ont été fondées après 1900 (Lille, Paris et Cluny).

<sup>13</sup> Voir A. Bazard, *Cours de Mécanique*, vol. I : "Mécanique théorique", Paris, E. Bernard, 1907 (d'après le programme du cours de Mécanique théorique et appliquée professé aux ENAM).

l'enseignement de la mécanique occupe une place centrale<sup>14</sup>. Il existe enfin une chaire de mécanique appliquée aux arts au Conservatoire national des arts et métiers.

À ces écoles généralistes, souvent anciennes, il faut ajouter les nouvelles écoles d'ingénieurs, plus spécialisées, qui apparaissent après 1890. Ces établissements, nés dans le sillage de la seconde révolution industrielle, se sont souvent spécialisés dans la formation d'ingénieurs chimistes et électriciens, mais, compte tenu de l'importance de la mécanique, ils ont aussi formés des ingénieurs mécaniciens. C'est le cas de Supélec et des petites écoles d'électricité parisiennes, Bréguet, Violet et Sudra, ainsi que de l'École supérieure de l'aéronautique et des constructions mécaniques fondée à Paris en 1909<sup>15</sup>. Enfin, parmi les instituts universitaires, relevant de l'enseignement supérieur, on compte plusieurs instituts électrotechniques dans lesquels existe un cours de mécanique appliquée, par exemple, l'Institut électrotechnique de Grenoble. Des sections spécialisées de mécanique sont même instituées en 1905 à l'Institut électrotechnique de Nancy, rebaptisé alors Institut d'électrotechnique et de mécanique appliquée, et en 1913 à l'Institut électrotechnique de Toulouse.

Sans "prolégomènes théoriques", l'enseignement de la mécanique donné dans les ENAM est essentiellement appliqué. Le niveau du cours, dans les années 1900, est plus qu'honorable, et peut être comparé à celui donné à l'École polytechnique un demi-siècle auparavant. Les mathématiques utilisées comprennent un peu d'analyse, mais sans franchir le seuil des équations aux dérivées partielles. Dans les instituts universitaires et dans certaines écoles comme l'École centrale lyonnaise et l'École supérieure d'aéronautique et de construction mécanique, à en juger par les programmes publiés<sup>16</sup>, le niveau des cours magistraux se rapproche même de celui des grandes écoles d'ingénieurs (l'École polytechnique et ses écoles d'application, École centrale des arts et manufactures).

Au niveau supérieur, c'est-à-dire dans les grandes écoles, il existe soit des cours de mécanique générale, articulant la mécanique rationnelle et ses applications industrielles, soit des cours spécialisés consacrés à la cinématique appliquée, aux machines, à la résistance des matériaux, à l'hydraulique, etc.. Dans tous les cas, les élèves de ces écoles, formés aux mathématiques, abordent les enseignements appliqués avec un fort bagage théorique : théorie

---

<sup>14</sup> Voir A. Boulanger, *Mécanique Appliquée*, 1ère Partie : "Mécanique des solides naturels (eu égard aux frottements)", 2ème Partie : "Élasticité et Résistance des Matériaux", 3ème partie : "Hydraulique", Lille, imprimerie J. Schaller, 1906 (cours professé à l'Institut Industriel du Nord).

<sup>15</sup> Sur les écoles d'électricité, voir A. Grelon, "Les enseignements de l'électricité" in Histoire de l'électricité en France, tome 1, 1881-1918, pp. 254-

<sup>16</sup> Programme des conditions d'admission et de l'enseignement à l'Institut industriel du Nord de la France à Lille, 1905, et Institut industriel du Nord de la France, *Plans d'études et programmes*, Lille, impr. de L. Danel, 1906 ; Programme des conditions d'admission et de l'enseignement à l'Institut électrotechnique et de mécanique appliquée-Université de Nancy, 1907 ; Programme des conditions d'admission et de l'enseignement à l'École centrale lyonnaise, 1913.

de l'élasticité pour la résistance des matériaux, hydrodynamique pour l'hydraulique et les moteurs hydrauliques, thermodynamique pour les moteurs thermiques. Dans les facultés des sciences, en revanche, s'il existe partout des chaires dites de mécanique rationnelle et appliquée, les cours sont purement théoriques et ne comprennent qu'exceptionnellement des enseignements de mécanique véritablement appliquée. Notons, à la Sorbonne, la chaire de mécanique physique et expérimentale occupée par G. Koenigs et celle d'aviation, fondée en 1910 et occupée par Marchis.

Qu'il s'agisse de grandes écoles ou d'écoles de niveau moyen, d'écoles anciennement établies ou de nouvelles fondations, l'enseignement de la mécanique appliquée en France au début du siècle souffre d'une très grave lacune : on ne trouve en effet nulle part de laboratoires de mécanique comparables aux équipements qui, à la même époque, se sont multipliés pour l'enseignement aux États-Unis, en Allemagne et, dans une moindre mesure, en Grande-Bretagne. Une seule école, l'Institut industriel du nord de la France, a mis en place dès avant 1900 un enseignement de ce type, sous l'impulsion de C. Codron<sup>17</sup>. Il s'agit d'un retard majeur qui ne sera que très progressivement comblé après la Première guerre mondiale.

Les caractères du corps professoral expliquent pour une large part cette indifférence à l'égard de l'enseignement expérimental en mécanique appliquée. Tous les enseignants sont des ingénieurs de formation, fortement marqués par la tradition des ingénieurs-savants à la française : mépris de la pratique, prééminence de la théorie, rôle des mathématiques. Les maîtres de la discipline, sont en grande majorité des polytechniciens des grands corps : H. Léauté, E. Sarrau, L. Lecornu, M. Lévy, qui enseignent la mécanique à l'École polytechnique et à l'École centrale des arts et manufactures ; A Liénard et E. Sauvage qui enseignent à l'École des mines, Ch. Rabut et E. Mesnager à l'École des ponts et chaussées, L. Jacob à l'École du génie maritime, A. Boulanger à l'Institut industriel du nord de la France. Aux ENAM, on trouve plutôt des centraliens, comme A. Gouilly, J. Bonhomme et P. Bourguignon. Il y a enfin quelques gadzarts, comme A. Bazard aux ENAM, Garry à l'École Diderot et Algrin à l'École spéciale des travaux publics.

### **Quel enseignement pour la mécanique appliquée ?**

Si les mêmes questions sont étudiées du haut en bas du système de formation, les modes d'exposition n'en connaissent pas moins de variations importantes. Comme on l'a vu, les relations avec la mécanique rationnelle et le recours aux mathématiques ne sont pas

---

<sup>17</sup> Voir C. Codron, "Essais mécaniques à l'Institut industriel du nord de la France à Lille", *Congrès international de mécanique, tenu au Conservatoire national des arts et métiers du 19 au 25 juillet 1900*, tome 1 : rapports présentés au Congrès, Dunod, 1900, pp. 233-242.

identiques quand on passe d'un niveau à un autre. En outre, plus le niveau s'élève, plus l'enseignement se spécialise, chacune des divisions de la mécanique appliquée tendant à se constituer en une entité autonome. Voyons donc de manière plus précise comment se présente cet enseignement au début de notre siècle, au moins pour les niveaux moyen et supérieur.

### *Les mécanismes et les machines*

C'est en 1838 que la cinématique théorique devient une "branche distincte" de l'enseignement de la mécanique générale, à l'occasion du cours de mécanique physique donné par Poncelet à la Faculté des Sciences de Paris<sup>18</sup>. En revanche, "ses applications", c'est à dire l'étude des mécanismes, constituent un chapitre propre du cours des machines dès la fondation de l'École polytechnique. Monge et ses élèves<sup>19</sup> lèguent à l'enseignement à la fois un objet — l'étude des transformations de mouvement dans les machines —, et une approche que l'on peut qualifier de classificatrice : chaque mécanisme est traité comme un opérateur de transformation du mouvement ; en considérant les différentes sortes de mouvement possibles (mouvements rectilignes continu ou alternatif, mouvements circulaires continu ou alternatif, etc.), on classe les mécanismes en fonction des transformations opérées entre "mouvement d'entrée" et "mouvement de sortie". C'est ainsi que les engrenages sont traités dans le chapitre sur la transformation d'un mouvement circulaire continu en un autre mouvement circulaire continu.

Un siècle plus tard, l'héritage de Monge est toujours vivant. La cinématique appliquée, dont l'enseignement figure dans tous les programmes, quel que soit le niveau, reste dominée par la logique classificatrice de ses débuts. Cependant les critères de classification ont pu varier. En général, ce sont les critères proposés au milieu du XIX<sup>e</sup> siècle par l'ingénieur anglais Willis (et quelquefois ceux de Haton de la Goupillière très proches des critères proposés par Willis) qui sont dorénavant adoptés dans l'enseignement des mécanismes. Ainsi, dans les cours des ENAM, de l'École supérieure d'aéronautique et de construction mécanique, de l'Institut électrotechnique de Toulouse et de l'École centrale des arts et manufactures, les mécanismes sont classés en fonction des modes de transmission du mouvement : par contact immédiat de roulement ou de glissement (engrenages, vis...) ; par l'intermédiaire d'un lien rigide (pivots, bielles...) ; par l'intermédiaire d'un lien rigide (poulies...)<sup>20</sup>. En revanche, dans le cours

---

<sup>18</sup> Voir K. Chatzis, "Jean-Victor Poncelet (1788-1867) ou le Newton de la mécanique appliquée. Quelques réflexions à l'occasion de son cours inédit à la Sorbonne", *Bulletin de la Société des amis de la Bibliothèque de l'École polytechnique*, à paraître en 1998.

<sup>19</sup> J.-N.-P. Hachette, *Programme du cours élémentaire des machines pour l'an 1808, suivi d'Essai sur la composition des machines par MM. Lanz et Bétancourt*, Paris, 1808. Voir, aussi, K. Chatzis, "Mécanique rationnelle...", art. cit..

<sup>20</sup> Voir P. Bourguignon, *Cours de Cinématique théorique et appliquée*, t. II : "Cinématique Appliquée", Paris, 1906 ; (?) Geffroy, *Cours de Mécanismes*, Paris, 1913 (lith.) ; M. Lamotte, *Cours de Mécanique appliquée*, Paris, 1922 ; A. Flamant, *Mécanique générale*, Paris et Liège, 1911).

élémentaire de mécanique industrielle des EPCI tout comme à l'École polytechnique, on s'en tient encore à la classification de Monge<sup>21</sup>. Notons par ailleurs les efforts isolés de G. Kœnigs, à la Sorbonne, qui essaie d'asseoir la classification des mécanismes sur des bases fournies par la cinématique théorique. Très critique à l'égard des classifications existantes, qu'il considère artificielles et arbitraires, il propose au début du siècle une théorie personnelle qui ne semble pas avoir exercé de grande influence sur l'enseignement<sup>22</sup>.

Massivement présente dans les programmes, la cinématique appliquée y occupe une place qui varie de manière considérable selon les niveaux d'enseignement. Dans les grandes écoles, elle est renvoyée au cours de géométrie après avoir été enseignée dans le cours de mécanique générale, à la suite de la cinématique théorique<sup>23</sup>. En revanche, dans les instituts universitaires<sup>24</sup> ainsi que dans plusieurs écoles d'ingénieurs de niveau moyen, l'École centrale lyonnaise par exemple, la cinématique appliquée figure dans le cours de mécanique appliquée, entièrement séparée de la cinématique théorique qui est enseignée en mécanique rationnelle. Les ENAM adoptent enfin un autre découpage, dans lequel la cinématique théorique et appliquée forme un cours autonome. Malgré ces disparités, il n'existe pas de différence notable dans le contenu de l'enseignement, ses modes et logiques d'exposition, au moins entre le niveau moyen et le niveau supérieur. Dans les deux cas, c'est l'étude des engrenages qui occupe la place centrale. S'y ajoutent les trains, les pignons et les crémaillères, les cames et les excentriques, les courroies, les bielles et les manivelles, les joints, les parallélogrammes, les poulies et les treuils, les vis.

Dans la mécanique appliquée, l'étude du mouvement prend en considération les "corps naturels" sur lesquels s'exercent des résistances dites passives, c'est-à-dire des résistances dues aux chocs et aux frottements. Ceci s'applique d'abord au fonctionnement de machines simples en équilibre<sup>25</sup>, à savoir le levier, le tour ou treuil, le plan incliné et leurs

---

<sup>21</sup> Voir E. Gouard et G. Hiernaux, *Cours élémentaire...*, *op. cit.*, ainsi que H. Leauté, *Cours de mécanique...*, *op. cit.* et E. Sarrau, *Cours de mécanique et Machines*, 2<sup>e</sup> division, 1900-1901, Paris, 1901 (lith.).

<sup>22</sup> G. Kœnigs, *Introduction à une théorie nouvelle des mécanismes*, Paris, 1905.

<sup>23</sup> Pour l'École centrale des arts et manufactures, voir L. Guillet, *Cent ans de la vie de l'École centrale des arts et manufactures, 1829-1929*, Paris, Éditions artistiques de Paris, 1929, pp. 107-108. Pour l'École polytechnique, voir : L. Lecornu, *Cours...*, *op. cit.*, et M. d'Ocagne, *Cours de Géométrie*, 1919-1920, 2 vol., Paris, 1920 (lith.).

<sup>24</sup> L'Institut polytechnique de Grenoble semble constituer une exception, puisque les mécanismes y font partie du cours de mécanique générale. Voir G. Ferroux, *Mécanique générale*, Paris, Albin Michel, 1920.

<sup>25</sup> Outre les programmes d'enseignement déjà cités (cf. *supra*), on peut consulter pour l'École polytechnique, H. Leauté, *Cours...*, *op. cit.*, E. Sarrau, *Cours...*, *op. cit.*, L. Lecornu, *Cours...*, *op. cit.* ; pour l'École centrale des arts et manufactures, A. Flamant, *Mécanique...*, *op. cit.* ; pour l'Institut industriel du Nord de la France, A. Boulanger, *Mécanique appliquée*, 1<sup>ère</sup> partie : "Mécanique des solides naturels", *op. cit.* ; pour les ENAM, A. Bazard, *Cours de mécanique*, vol. 2 : "Résistances passives, résistances des matériaux, statique graphique", 1907, et L. Guillot, *Cours de mécanique*, t. 1 : "Principes et théorèmes généraux de la Mécanique - statique graphique - résistance des matériaux", Paris, 1911.

combinaisons les plus élémentaires, vis à filets carrés, coins, poulies, palans, freins et pivots, puis au fonctionnement des machines en mouvement. Cette dernière étude, souvent désignée sous le nom de dynamique appliquée, porte sur la puissance et le rendement des machines, le frein de Prony et la régularisation du mouvement de machines (volants et régulateurs de Watt). À l'instar de la cinématique appliquée, c'est dans les instituts universitaires et dans quelques écoles de niveau moyen comme l'École centrale lyonnaise que la dynamique appliquée forme une entité distincte d'enseignement<sup>26</sup>. En revanche, à l'École polytechnique par exemple, on préfère traiter des questions relevant de la dynamique appliquée dans le cadre du cours de mécanique générale<sup>27</sup>. Dans les ENAM ainsi qu'à l'École supérieure d'aéronautique et de construction mécanique, ces questions sont abordées dans la partie de la mécanique appliquée consacrée aux moteurs<sup>28</sup>.

### *La Résistance des matériaux*

Contrairement aux mécanismes et aux machines, la résistance des matériaux est traitée de manière très différente selon le niveau d'enseignement. Pour plus de clarté, nous prendrons comme référence et point de comparaison le cours donné aux ENAM. Les déformations et contraintes associées prises en compte dans ce cours sont l'extension (traction), la compression, le cisaillement (glissement), la flexion, le flambage et la torsion ainsi que leurs combinaisons (notamment combinaison de la flexion et de la torsion). Les objets étudiés sont les poutres de différentes sections (rectangulaire, en double-té, d'égale résistance), des pièces courbes, les systèmes articulés plans (déformables, tels les ponts suspendus, et indéformables, telles la poutre Warren, la poutre de hauteur variable, la ferme anglaise et la ferme Polonceau, la grue à volée, la ferme à trois articulations) ainsi que les différentes organes de machines (chaudières et réservoirs, cylindres à parois épaisses, rivures, joints, tiges de pistons, bielles, manivelles, arbres, volants, roues dentées, courroies, ailettes des turbines à vapeur, diverses sortes de ressorts)<sup>29</sup>. Les méthodes mathématiques employées sont graphiques et analytiques. Les tensions et compressions des barres des systèmes articulés sont calculées uniquement à l'aide des méthodes de la statique graphique (méthode des figures réciproques de Cremona ; la méthode de Ritter est mentionnée en passant). En revanche, pour calculer les moment fléchissants et les efforts tranchants des poutres hyperstatiques, on utilise l'équation de la

<sup>26</sup> Pour l'Institut électrotechnique de Toulouse, voir M. Lamotte, *Cours...*, *op. cit.*.

<sup>27</sup> Pour l'École polytechnique, voir L. Lecornu, *Cours de mécanique*, 1ère div. 1911-12, Paris, 1912 (lith.).

<sup>28</sup> Pour les ENAM, voir L. Guillot, *Cours de mécanique*, t. 4 : "Moteur à gaz et à pétrole - Régularité de la marche des machines - mesure des forces et du travail", Paris, 1918 ; pour l'École supérieure d'Aéronautique et de construction mécanique, voir L. Lecornu, *Théorie des moteurs*, Paris, 1911 (lith.).

<sup>29</sup> Voir L. Guillot, *Cours de mécanique*, *op. cit.*, t. 1 : "Principes..." ; A. Bazard, *Cours de mécanique*, *op. cit.*, vol. 2 : "Résistances passives...".

ligne élastique (méthode analytique). Enfin, les poutres isostatiques sont traitées à la fois par le calcul et par la statique graphique.

En passant des ENAM aux grandes écoles, on repère plusieurs différences significatives<sup>30</sup>. En premier lieu, l'étude de la résistance des matériaux y est précédée d'un exposé assez développé de la théorie de l'élasticité. Il s'agit d'une innovation de l'extrême fin du XIX<sup>e</sup> siècle, la résistance des matériaux étant enseignée jusqu'alors sans prolégomènes théoriques, y compris dans les grandes écoles. Trois raisons semblent expliquer la création de ce cours introductif<sup>31</sup> : l'Élasticité fournit d'abord quelques rares solutions pratiques, par exemple pour la torsion des cylindres droits et les résistances des enveloppes cylindriques ou sphériques. Mais son intérêt, selon les enseignants, dépasse son utilité immédiate. Elle rend plus sûre l'usage des formules empiriques, en particulier dans les cas où l'on sort des limites dans lesquelles elles ont été expérimentalement vérifiées, et elle fournit au futur ingénieur une base rationnelle solide pour l'étude de nouveaux problèmes.

Outre l'élasticité, les élèves des grandes écoles abordent dans le cours de résistance des matériaux une série de thèmes ignorés des gadzarts, telles la stabilité des corps en mouvement, les vibrations élastiques, les charges instantanées et la résistance aux chocs<sup>32</sup>. Mieux formés théoriquement, ils disposent d'une palette plus large d'outils pour traiter les problèmes. Pour chaque question, ils étudient à la fois la solution analytique et la solution graphique, alors que l'enseignement des ENAM sélectionne comme on l'a vu un seul type de solution, soit graphique, soit analytique. L'opposition entre l'enseignement des grandes écoles et celui des écoles de niveau moyen ne se réduit donc pas à une opposition entre l'analyse et le calcul graphique, au moins pour ce qui concerne la résistance des matériaux : un polytechnicien a fait plus de statique graphique qu'un gadzart. Les objets et les situations traités dans le cadre de la résistance des matériaux sont enfin d'une complexité plus grande quand on passe du niveau moyen au niveau supérieur. Ainsi, alors que les élèves des arts et métiers se limitent à l'étude des systèmes articulés plans isostatiques, les futurs ingénieurs des ponts et chaussées étudient à la fois des systèmes à trois dimensions et des systèmes plans à lignes surabondantes. Dans l'étude des poutres, les premiers se contentent du cas d'une poutre encastrée à ses deux extrémités avec des charges fixes ; l'ingénieur sorti d'une grande école

---

<sup>30</sup> Voir, pour l'École polytechnique, H. Léauté, *Cours de mécanique*, 1<sup>ère</sup> division, 1898-1899, Paris, 1899 (lith.) ; L. Lecornu, *Cours de mécanique*, 1<sup>ère</sup> div. 1911-12, Paris, 1912 (lith.) ; pour l'École des ponts et chaussées, J. Résal, *Résistance...*, *op. cit.*, et *Stabilité des constructions*, Paris, 1901 ; pour l'École des Mines, A. Lienard, *Cours de Résistance des Matériaux et Construction*, 1913-14, Paris, 1914 (lith.) ; pour l'École centrale des arts et manufactures, L. Guillet, *Cent ans...*, *op. cit.*, p. 114, et les cahiers des élèves archivés à la bibliothèque de l'École centrale.

<sup>31</sup> Voir J. Résal, *Résistance...*, *op. cit.*, p. 198 et A. Flamant, *Stabilité des constructions. Résistance des matériaux*, Paris, 1909 (3<sup>ème</sup> éd.), p. 3.

<sup>32</sup> Voir J. Résal, *Résistance ...*, *op.cit.*

aborde en revanche toutes les configurations possibles, tant au niveau des structures (poutres continues, arcs de diverses sortes, isostatiques et hyperstatiques) qu'à celui des charges (charges fixes, charges mobiles).

Le cours de résistance des matériaux dans les instituts universitaires et les écoles d'ingénieurs spécialisées se situent entre celui des ENAM et celui des grandes écoles<sup>33</sup>. Les principes généraux de la théorie de l'élasticité sont parfois rapidement présentés aux élèves et la résistance des matériaux comporte des sujets qui ne sont pas abordés dans les ENAM, tels les poutres continues pour lesquelles sont données à la fois les solutions graphiques et les solutions analytiques, et les arcs hyperstatiques. En revanche, des questions traitées dans les grandes écoles telles que l'étude de charges mobiles, le calcul des systèmes articulés dans l'espace et la stabilité des corps en mouvement, sont en général absentes du programme de ces établissements.

Alors que les futurs gadzarts, et dans une moindre mesure, les élèves des instituts universitaires reçoivent une formation de généralistes en résistance de matériaux, les élèves des grandes écoles et de quelques écoles spécialisées suivent également plusieurs cours d'application traitant de cette discipline, selon des modalités qui varient d'ailleurs avec les établissements. C'est ainsi qu'à l'École des ponts et chaussées, à l'École centrale des arts et manufactures et à l'École spéciale des travaux publics par exemple sont dispensés des enseignements spécifiques sur les constructions métalliques, les ouvrages en maçonnerie et en béton armée.

### *Les moteurs*

L'étude des moteurs constitue traditionnellement une partie très importante de l'enseignement de mécanique appliquée, divisée en moteurs hydrauliques et en moteurs thermiques. Le développement des industries électriques et des nouvelles industries mécaniques, comme l'automobile et l'aviation, explique la place grandissante qu'y occupent les turbines hydrauliques et les moteurs à combustion interne.

Dans les ENAM, l'enseignement sur l'hydraulique et les moteurs hydrauliques se présente de la façon suivante<sup>34</sup> : après l'étude de l'hydrostatique, on passe à l'hydraulique proprement

---

<sup>33</sup> Pour les instituts universitaires et les écoles de niveau moyen autres que les ENAM, outre les programmes d'enseignement déjà cités, nous avons consulté les documents suivants : pour l'Institut industriel du Nord, A. Boulanger, *Mécanique appliquée...*, *op. cit.* ; pour l'Institut électrotechnique et de mécanique appliquée de Toulouse, L. Roy, *Cours de mécanique appliquée*, t. 2, "statique graphique et résistance des matériaux", Paris, 1921 ; pour l'Institut polytechnique de Grenoble, G. Prudon, *Résistance des matériaux*, Paris, 1921 ; pour l'École supérieure d'aéronautique et de construction mécanique, J. Bonhomme, *Cours de résistance des matériaux*, Paris, 1919.

<sup>34</sup> Voir L. Guillot, *Cours de mécanique*, *op. cit.*, t. 2 : "Mécanique spéciale des fluides. Hydraulique -

dite, fondée sur l'application du théorème de Bernoulli. On étudie successivement l'écoulement permanent par les orifices, les déversoirs, les ajutages, l'écoulement dans des tuyaux et des canaux et des questions de jaugeage. Viennent ensuite les moteurs hydrauliques, c'est-à-dire les différentes sortes de roues, les turbines hydrauliques, les pompes et les ventilateurs.

Comparé à celui des ENAM, l'enseignement dans les grandes écoles se caractérise là encore par ses exigences théoriques et sa plus grande exhaustivité<sup>35</sup>. Le cours d'hydraulique est précédé d'une présentation substantielle de l'hydrodynamique, où sont abordés les problèmes de viscosité et de tourbillons. Le cours est aussi plus complet que dans les ENAM, puisque on y traite des questions relatives aux mouvements permanents variés et aux mouvements non permanents (propagation d'un ressaut, onde solitaire, ondes périodiques, etc.). Comme pour le cours de résistance des matériaux, l'étude des moteurs hydrauliques dans les instituts universitaires et les écoles d'ingénieurs spécialisées se situent entre les ENAM et les grandes écoles<sup>36</sup>. Les équations générales d'hydrodynamique (pour des fluides parfaits) ne sont pas inconnues des élèves fréquentant ces établissements, mais une fois celles-ci présentées, on passe immédiatement au théorème de Bernoulli qui constitue la base théorique du cours d'hydraulique.

Examinons maintenant l'enseignement relatif aux moteurs thermiques. Le cours donné dans les ENAM<sup>37</sup> s'ouvre sur un exposé théorique présentant succinctement les connaissances thermodynamiques nécessaires à l'étude des moteurs thermiques. On y trouve les principes généraux de cette science (équivalence du travail et de la chaleur, principe de conservation), la notion d'entropie et le diagramme entropique, les différentes transformations d'une masse gazeuse (isothermiques, adiabatiques), le cycle et le principe de Carnot, des notions sur les

---

Thermodynamique - Air comprimé", Paris, 1911 ; A. Bazard, *Cours de mécanique, op. cit.*, t. 3 : "Hydraulique", Paris, 1907.

<sup>35</sup> Voir, pour l'École polytechnique, H. Léauté, *Cours de mécanique*, 1ère division 1898-1899, *op. cit.* ; L. Lecornu, *Cours de mécanique*, 1ère div. 1911-12, *op. cit.* ; pour l'École des ponts et chaussées, M. Rabut, *Cours d'hydraulique*, 1909-1910, Paris, 1910 (lith.) ; pour l'École des mines de Paris, E. Jouguet, *Cours de Machines*, 1920-1921, 1921 (lith.) ; pour l'École centrale des arts et manufactures, C. Monteil, *Cours d'hydraulique théorique*, Nancy, 1919

<sup>36</sup> Outre les programmes d'enseignement, voir, pour l'Institut industriel du Nord, A. Boulanger, *Mécanique appliquée...*, *op. cit.* ; pour l'École centrale lyonnaise, J. Grialou, *Cours d'hydraulique*, Paris, 1916 ; pour l'École supérieure d'aéronautique et de construction mécanique, L. Lecornu, *Théorie des moteurs, op. cit.*, et Laboureur, *Cours de Moteurs hydrauliques et Air comprimé*, Dijon, (s.d.) ; pour l'Institut polytechnique de Grenoble, G. Routin, *Cours d'hydraulique industrielle*, Paris, Albin Michel, 1922. Le cours d'E. Jouguet, *Mécanique des fluides*, Saint-Etienne, 1904, professé à l'École supérieure des mines de Saint-Etienne est un cas intéressant d'enseignement théorique pour une école de niveau moyen.

<sup>37</sup> Voir : L. Guillot, *Cours de mécanique*, t. 2 : "Hydraulique.." t. 3, *op. cit.* ; "Chaudières à vapeur -Machines à vapeur", Paris et Liège, 1913, t. 4 : "Moteurs à gaz et à pétrole...", *op. cit.* ; A. Bazard, *Cours de mécanique*, t. 4 : "Chaudières et machines à vapeur - Turbines à vapeur", Paris, 1910, t. 5 : "Moteurs à combustion interne", Paris, 1914.

gaz (lois de Mariotte et de Gay-Lussac) et sur les vapeurs (vapeurs saturées, vapeurs surchauffées, tables de Zeuner, vitesse d'écoulement à la sortie d'une tuyère). Sont traités ensuite en détail les compresseurs, les chaudières à vapeur, les machines à vapeur, les turbines à vapeur, ainsi que les différents moteurs à gaz et à pétrole (gazogènes, moteurs d'automobile et d'aviation, moteurs fixes).

Le niveau théorique s'élève nettement quand on passe des ENAM aux grandes écoles<sup>38</sup>, sans d'ailleurs que la thermodynamique enseignée sorte du paradigme "macroscopique". Alors que les connaissances théoriques des futurs gazdarts se réduisent aux notions de thermodynamique *strictement nécessaires* à l'étude des différents moteurs thermiques, les élèves des grandes écoles suivent un enseignement de pure théorie, sans utilité pratique, avant d'aborder des connaissances opérationnelles. Ainsi, alors que le principe d'équivalence enseigné dans le cours donné aux ENAM est appliqué d'emblée au seul cas d'un cycle fermé (transformation où l'état final est identique à l'état initial), dans les grandes écoles on commence par envisager le cas général d'une transformation ouverte. Des sujets ignorés des futurs gazdarts, telles la formule de Clapeyron, les fonctions de Massieu, et des développements substantiels sur la thermodynamique des fluides, marquent également la différence théorique qui sépare le niveau moyen du niveau supérieur. En revanche, la rareté de la documentation ne nous permet pas de situer sur cette échelle l'enseignement des moteurs thermiques dispensés dans les instituts universitaires et dans les écoles d'ingénieurs spécialisées<sup>39</sup>.

\* \* \*

\*

L'enseignement de la mécanique appliquée tel qu'il existe en France au début du XX<sup>e</sup> siècle est l'héritier d'une longue et brillante tradition. C'est ce qui fait à la fois sa force et sa faiblesse. Sa force, car les cours sont de haute qualité, non seulement dans les grandes écoles mais aussi aux niveaux élémentaires et moyens. Les connaissances y sont régulièrement mises à jour et les machines, structures et mécanismes associés aux plus récents progrès techniques soigneusement étudiés. D'un autre côté, l'enseignement souffre d'une excessive uniformité, la même vision s'imposant du haut en bas du système de formation technique. Il

---

<sup>38</sup> Voir, pour l'École centrale des arts et manufactures, C. Monteil, *Principes généraux de Thermodynamique et de Mécanique des Fluides*, Nancy, 1920 ; pour l'École des ponts et chaussées, M. Roy, *Cours des moteurs thermiques. Machines à vapeur et Moteurs à combustion interne*, Paris, sept. 1934 (dact.).

<sup>39</sup> Voir néanmoins, pour l'École centrale lyonnaise, Ph. Schereschewsky, *Éléments de thermodynamique*, Lyon, Imprimerie A. Rey, 1921 ; pour l'École spéciale des Travaux publics, M. Lacoïn, *Notions sur les moteurs à explosion et combustion*, Paris, 1921 (dact.) ; pour l'École supérieure d'aéronautique, L. Lecornu, *Théorie des moteurs*, *op. cit.*.

s'agit chaque fois d'appliquer des théories, plus ou moins mathématisées. Le recours à l'expérimentation demeure accessoire et n'implique jamais d'exercices pédagogiques spécifiques en laboratoire. À cet égard, le retard français est considérable et ne sera, semble-t-il, que très partiellement rattrapé dans l'Entre-deux-guerres.