

LA RÉCEPTION DE LA STATIQUE GRAPHIQUE EN FRANCE DURANT LE DERNIER TIERS DU XIX^e SIÈCLE

Konstantinos CHATZIS (*)

RÉSUMÉ. — Communément associée au nom de l'ingénieur allemand Carl Culmann, la statique graphique a failli, en fait, naître à plusieurs reprises en France. En avance dans un premier temps, les savants et ingénieurs français vont pourtant « rater » l'occasion de devenir les véritables créateurs de cette méthode de calcul graphique. Élaborée pour l'essentiel en dehors de l'Hexagone, la statique graphique va se diffuser en France durant le dernier tiers du XIX^e siècle comme un produit d'importation et avec un net retard par rapport à d'autres pays. L'objectif principal de cet article est d'étudier les différentes facettes de ce processus de diffusion tardive : aspects temporels et modalités de la diffusion, acteurs impliqués, débats suscités (partie II). Une première partie retrace, au préalable, les nombreuses naissances « avortées » de la nouvelle science en France, de Varignon à Poncelet. La conclusion générale aborde enfin la question plus générale de l'amnésie qui peut frapper une communauté concernée par un champ de savoirs au cours de son histoire. Elle met en lumière les différents facteurs susceptibles de favoriser un tel phénomène.

ABSTRACT. — FRANCE'S RECEPTION OF GRAPHIC STATICS AT THE END OF THE NINETEENTH CENTURY. — Commonly linked with the name of German engineer Carl Culmann, graphic statics failed, in fact, to be born on several occasions in France. In advance initially, the French scientists and engineers however will “miss” the occasion to become the true creators of this method of graphic calculation. Worked out essentially apart from the “Hexagone”, graphic statics will be diffused in France during the last third of the XIXth century like a product of importation and with a sharp delay compared to other countries. The main purpose of this paper is to study the various facets of this process of late diffusion : temporal aspects and methods of the diffusion, actors implied, caused debates (part II). A first part recalls, as a preliminary, the many

(*) Texte reçu le 23 septembre 2003, accepté le 16 février 2004.

K. CHATZIS, Laboratoire Techniques, Territoires et Sociétés (LATTs), École Nationale des Ponts et Chaussées (ENPC), 6-8, avenue Blaise Pascal, Cité Descartes, 77455 Marne-la-Vallée CEDEX 2 (France). Courrier électronique : chatzis@mail.enpc.fr.

Mots clés : calcul graphique, statique graphique, polygone funiculaire, Varignon, Camus, Poncelet, Culmann, Lévy.

Classification AMS : 01A50, 01A55, 65S05, 70C20, 70-03.

“abortive” births of the new science in France, from Varignon to Poncelet. The general conclusion tackles finally the more general question of the amnesia which can strike a community concerned with a field of knowledge during its history. It clarifies the various factors likely to support such a phenomenon.

INTRODUCTION

À en croire Théodore Zeldin, professeur d’histoire à Oxford et spécialiste des « passions françaises » [Zeldin 1994], les Français sont « [...] soit en retard, soit en avance. Ils sont rarement à l’heure des autres » [Zeldin 2002, p. 8]. Les relations que les ingénieurs français ont entretenues avec la statique graphique illustrent particulièrement bien les propos de cet auteur.

Communément associée au nom de l’ingénieur allemand Carl Culmann, qui est considéré par contemporains et historiens comme son père fondateur, la statique graphique a failli, en fait, naître à plusieurs reprises en France. À l’extrême fin du XVII^e siècle, Philippe de la Hire développe dans son *Traité de mécanique* [La Hire 1695] une construction graphique qui peut être rétrospectivement décrite comme une application directe de la notion de polygone funiculaire (précisons que La Hire n’emploie pas ce terme), celle-ci figurant parmi les concepts de base de la future statique graphique (voir Annexe). Dans la *Nouvelle mécanique* de Pierre Varignon, publiée à titre posthume en 1725, le polygone funiculaire est le nom d’un objet matériel qui reçoit ses premiers traitements graphiques (voir Annexe et plus bas). Un élève de Varignon, le mathématicien et mécanicien Charles-Étienne-Louis Camus, emboîte le pas à son maître : vers le milieu du XVIII^e siècle, il traite du polygone funiculaire de façon plus approfondie, toujours du point de vue graphique. Dans les années 1825–1845, le polytechnicien et officier du génie Jean-Victor Poncelet « réinvente » à deux reprises les constructions graphiques de Camus, sans se référer à son prédécesseur, et les applique à l’étude des ponts suspendus, à savoir des ouvrages d’art qui se développent en France à partir des années 1820.

En avance, dans un premier temps, par rapport à leurs collègues étrangers, les savants et ingénieurs français vont « rater » l’occasion de devenir les véritables créateurs de la statique graphique, discipline dont les prémices sont pourtant contenues dans les travaux des auteurs précités. Ce sont les ingénieurs suisses et allemands, épaulés par des

mathématiciens italiens, qui vont cultiver pour l'essentiel cette méthode de calcul graphique¹. Du coup, la statique graphique deviendra pour les ingénieurs français un produit d'importation qui va se diffuser au sein de leur communauté avec un net retard, par rapport à d'autres pays, durant le dernier tiers du XIX^e siècle.

L'objectif principal de cet article est d'étudier les différentes facettes de ce processus de diffusion tardive. Nous y consacrerons trois sections, interdépendantes, mais que nous avons préféré isoler afin de faire mieux ressortir les principales conclusions de la recherche. La première section, la plus longue, porte sur le contenu et sur les aspects temporels du processus de diffusion de la statique graphique dans la France du dernier tiers du XIX^e siècle. Une périodisation du phénomène est ainsi établie. Pour chaque période identifiée, les modalités concrètes de la diffusion — mentions, traductions des ouvrages étrangers, ouvrages écrits par des auteurs français, introduction de la statique graphique dans l'enseignement — sont précisées². Les différents acteurs, individuels et institutionnels, impliqués dans le processus de diffusion, sont également mentionnés et leur rôle est évalué. La deuxième section de l'article propose un exposé des débats accompagnant la réception de la statique graphique ainsi qu'une présentation des conceptions que l'on s'en fait en France pendant cette période. Le passage à la troisième section marque un infléchissement dans la progression de l'analyse : après avoir dessiné les grandes lignes du mouvement de réception de la statique graphique en France au XIX^e siècle, nous essayons de fournir, dans une partie de facture plus interprétative, quelques éléments d'explication de l'accueil réservé à la nouvelle science.

Ces trois sections forment ensemble la seconde partie de l'article. En effet, si le processus de diffusion en France de la statique graphique durant le dernier tiers du XIX^e siècle constitue le cœur de ce travail, nous avons voulu, en guise d'introduction au sujet, présenter au préalable, ne serait-ce que de façon sommaire, les nombreuses naissances « avortées » de cette méthode de calcul graphique en France, de Varignon à Poncelet (partie I).

¹ Sur le champ du calcul graphique, en général, et la place qu'y occupe la statique graphique, en particulier, le lecteur peut se reporter à l'excellent article de D. Tournès [2000].

² Nous nous inspirons ici des réflexions avancées par [Crosland *et al.* 1979], p. 2 en particulier.

Cela nous offrira l'occasion de poser dans une conclusion générale la question de l'amnésie qui peut frapper une communauté concernée par un champ de savoirs au cours de son histoire, et de nous interroger sur les différents facteurs susceptibles de favoriser un tel phénomène.

I. DE VARIGNON À PONCELET : LE CAS D'UN OUBLI

Dans la préface écrite pour la traduction française de son *Traité de statique graphique*, Culmann [1880] rend un hommage appuyé aux ingénieurs français pour avoir résolu dans le passé plusieurs problèmes relatifs à l'art de l'ingénieur par des méthodes graphiques. L'auteur allemand se réfère tout particulièrement aux multiples travaux graphiques que le polytechnicien et officier du génie Poncelet avait consacrés à la théorie des voûtes et aux murs de soutènement. Et Culmann précise :

« Poncelet n'a cependant pas fait usage, pour déterminer les résultantes, du polygone funiculaire [...], et il était réservé à son successeur à l'École de Metz, M. Michon, d'en faire le premier l'application à la détermination des centres de gravité des voussoirs, dans sa *Théorie des voûtes* » [Culmann 1880, p. ix-x].

Ce passage tiré de la préface de la traduction française de l'ouvrage de Culmann nous paraît symptomatique de l'oubli qui avait frappé les travaux français autour du polygone funiculaire. Si l'attribution par Culmann à Pierre-Félix Michon de la paternité de l'application du polygone funiculaire à la détermination des centres de gravité des voussoirs semble avérée³, en revanche les propos de l'auteur relatifs à Poncelet sont inexacts, ou, pour le moins, ambigus. En réalité, Poncelet a fait appel à plusieurs reprises au polygone funiculaire, en dehors, il est vrai, de ses travaux sur les voûtes et les murs de soutènement. Ce faisant, l'auteur ne fait que s'inscrire par ailleurs dans une tradition française qui traverse le siècle des Lumières. Tout semble avoir commencé avec Varignon ([Scholz 1994], [Henneberg 1909], [Maurer 1998]).

Le polygone funiculaire occupe une place importante dans la *Nouvelle mécanique* du mathématicien et mécanicien Varignon, ouvrage publié

³ Michon utilise en effet le polygone funiculaire pour déterminer le centre de gravité des voussoirs [Michon 1848, p. 29-31]. Est-il le premier à le faire comme Culmann le prétend ? À l'heure actuelle, nul n'est en mesure de l'affirmer, ni d'ailleurs de l'infirmier. Il est en revanche certain que Culmann se trompe quand il avance que Michon a succédé à Poncelet. Michon a été professeur de construction à l'École de l'artillerie et du génie de Metz, de 1843 à 1848, alors que Poncelet avait enseigné dans cet établissement, de 1825 à 1834, le cours de machines [Chatzis 1996, p. 32-42].

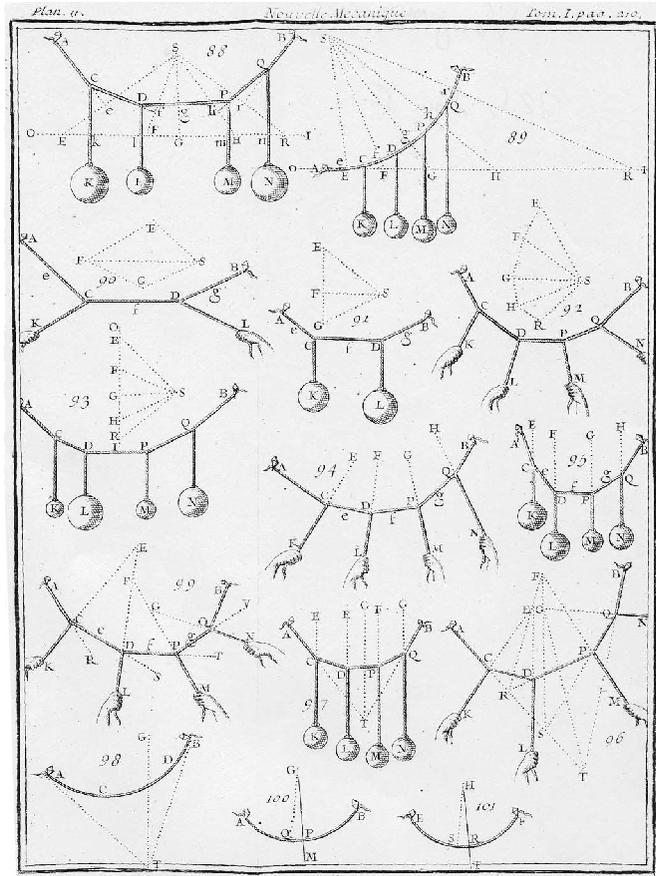


Figure 1. *Le polygone funiculaire dans la Nouvelle mécanique de Varignon* [1725]

en 1725 à titre posthume [Varignon 1725, p. 179–209]⁴. Varignon emploie l'expression de « polygone funiculaire » pour désigner une corde qui est tirée par des poids ou par des forces qui ne sont pas verticales. L'auteur utilise des méthodes graphiques essentiellement pour *définir les condi-*

⁴ Comme nous l'avons noté dans l'introduction, La Hire (1640–1718) utilise dans ses calculs des arcs en pierre une méthode graphique qui, traduite dans le langage d'aujourd'hui, fait intervenir le polygone funiculaire correspondant aux poids des voussours [La Hire 1695, prop. CXXV, p. 465–470]. Sur la construction graphique de La Hire, voir les commentaires de Timoshenko [1953, p. 63–64] et de Benvenuto [1991, p. 324–326].

tions d'équilibre de cet objet matériel, même s'il traite également de façon accessoire (dans les démonstrations, par exemple) de la question des *tensions internes* des cordons formant l'objet. Les constructions graphiques de Varignon seront reprises dans d'autres textes influents du XVIII^e siècle⁵, tels que le *Traité élémentaire de mécanique statique* de l'Abbé Charles Bossut [1772], ou le *Traité élémentaire de statique* de Gaspard Monge [1810]. Mais c'est le mathématicien Camus (1699–1768), académicien et examinateur dans plusieurs établissements militaires, élève de Varignon, qui, dans son *Cours de mathématique*, présente le traitement le plus complet du polygone funiculaire du point de vue graphique, puisqu'il va au-delà de son maître en proposant, de façon explicite cette fois, une méthode de calcul graphique également pour les tensions internes des cordons qui composent l'objet [Camus 1752, 3^e partie, t. 2, Livre III, ch. 2].

Arrêtons-nous l'espace de quelques lignes sur Camus et son cours de mathématiques. En un certain sens, la future statique graphique est contenue « en puissance » dans les démonstrations et les constructions graphiques figurant dans cet ouvrage. À une différence près : dans le livre de Camus, comme dans tous les ouvrages du XVIII^e siècle que nous venons de citer, le polygone funiculaire est un objet matériel que l'on souhaite traiter à l'aide de calculs graphiques (voir Annexe, 2^e partie). Il n'est pas encore un concept mathématique (ensemble des lignes : voir la première partie de l'Annexe), susceptible d'être employé pour traiter par voie graphique des structures matérielles conçues et construites par l'ingénieur, comme les poutres, les arcs, *etc.* Mais poursuivons la préhistoire de la statique graphique.

Si l'époque des Lumières françaises réserve au polygone funiculaire des traitements graphiques, le XIX^e siècle aborde l'objet essentiellement par la voie de l'analyse. Cette nouvelle façon de traiter du polygone funiculaire, qui est toujours appréhendé en France dans les premières décennies du XIX^e siècle comme un objet matériel, a des liens étroits avec la fondation de l'École polytechnique en 1794, à l'origine de l'apparition d'une nouvelle figure de l'ingénieur, rompu à l'analyse et au calcul différentiel et intégral [Belhoste 2003]. Abordé à l'aide de l'analyse à l'École polytechnique ainsi que dans ses écoles d'application, telles que l'École des ponts et

⁵ Sur les manuels du XVIII^e siècle, voir [Dhombres 1985].

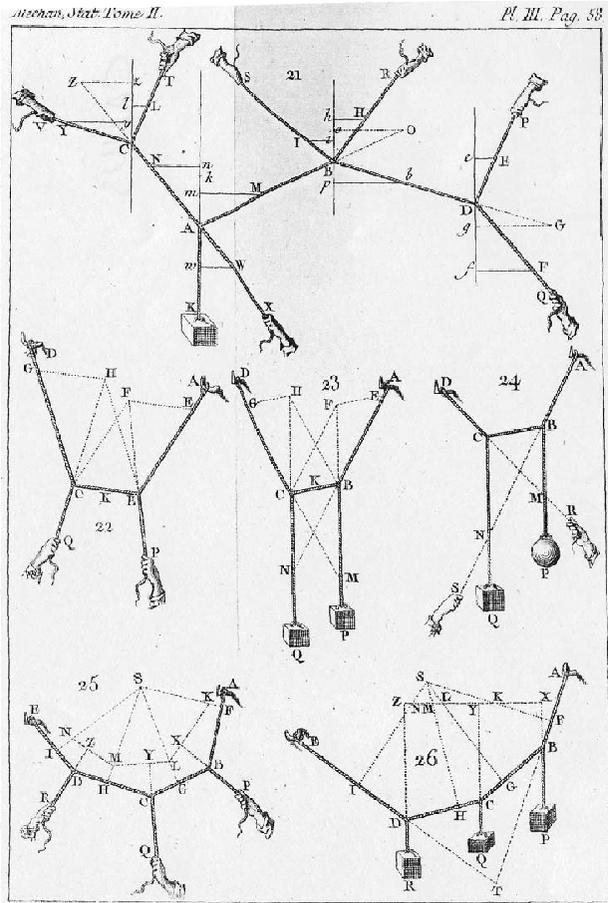


Figure 2. *Le polygone funiculaire dans le Cours de mathématique de Camus [1752]*

chaussées⁶, le polygone funiculaire n'en continue pas moins à recevoir des traitements graphiques dans le cadre de cours de mécanique adressés, à l'instar de l'enseignement dispensé dans les années 1820 par Charles

⁶ Le polygone funiculaire est traité à l'École polytechnique dans le cadre du cours de mécanique rationnelle. Pour la période 1800–1850, voir par exemple [Prony an VIII], [Francoeur 1825, p. 96–100], [Poisson 1811] et [Navier 1833–1834, 2^e année, p. 11–15]. Sur l'enseignement de la mécanique à l'École polytechnique pendant cette période, voir [Chatzis 1994]. Pour le traitement du polygone funiculaire à l'École des ponts et chaussées, dans le cadre du cours de mécanique appliquée, voir par exemple [Bélanger 1842–1843, ch. 2].

Dupin au Conservatoire (royal) des arts et métiers [Dupin 1826, t. II, 6^e leçon], à un public peu habitué à l'analyse car composé d'ouvriers et d'artisans. C'est à l'occasion d'un tel cours que Poncelet (1788–1867) « réinvente », en deux étapes, les constructions graphiques de Camus, qui semblent être tombées entre-temps dans l'oubli.

De 1827 à 1830, Poncelet, professant déjà depuis 1825 devant les élèves-ingénieurs de l'École de l'artillerie et du génie de Metz un cours de machines [Chatzis 1996], dispense parallèlement à la mairie de la ville, devant un public d'ouvriers et d'artisans cette fois, un cours du soir ayant comme objet la mécanique industrielle [Poncelet 1827–1830]. Dans ces leçons, où le calcul infinitésimal est totalement absent, l'auteur aborde, entre autres, des questions relatives à l'équilibre et à la stabilité des corps ainsi que des problèmes relevant de la résistance des matériaux [Chatzis 2002]. Au milieu de diverses considérations sur ces sujets, Poncelet développe une méthode de calcul graphique des tensions des cordons qui composent un polygone funiculaire, dans le cas particulier où celui-ci est tiré uniquement par des poids (forces verticales). La solution graphique donnée par l'auteur (pour un aperçu, voir 2^e partie de l'Annexe) est identique à celle qu'on trouve chez Camus. Notons que par rapport aux instructions postérieures, la figure géométrique qui comporte le pôle a subi, dans le cas de Poncelet, une rotation de 90 degrés autour de ce pôle [Poncelet, 1827–1830 : 2^e partie, 1828–1829, p. 64–67]⁷. Poncelet, qui, par ailleurs, ne cite pas Camus, ignorait-il les travaux de ce dernier ?

Quelques années plus tard, dans son cours de mécanique physique et expérimentale à la Sorbonne, professé de 1838 à 1848⁸ [Chatzis 1998],

⁷ Andreas Kahlow [1997, p. 35] se réfère au manuel datant de 1831 d'un certain dénommé Brix, manuel qui, selon lui, « s'appuie sur les thèses fondamentales de Poncelet concernant les rapports entre le polygone des forces et le polygone funiculaire ». Étant donné les dates du cours du Poncelet à Metz et la date de publication du traité de Brix, ce dernier ne peut se référer qu'au cours de mécanique industrielle de l'auteur français dispensé à la mairie de Metz. Si l'information est avérée, on peut conclure que la contribution de Poncelet à la naissance de la future statique graphique était potentiellement disponible pour la communauté des ingénieurs de langue allemande dès les années 1830. Il reste à évaluer l'importance de l'audience du traité de Brix (notons que le traité de Brix, comme le cours de Poncelet à la mairie de Metz, est cité par Lebrecht Henneberg dans la partie historique de son article sur la statique graphique [1909, p. 350]).

⁸ Ce cours est resté jusqu'à présent inédit, mais on en trouve une rédaction correspondant à l'année 1840–1841, assurée par l'officier d'artillerie Arthur Morin, aux archives

Poncelet récidive en donnant la solution graphique pour un polygone funiculaire tiré non plus seulement par des poids (forces verticales), mais par des forces ayant une direction quelconque. Cette fois, les constructions graphiques sont identiques à celles que les promoteurs de la statique graphique adopteront par la suite [Poncelet 1840–1841, p. 363–369].

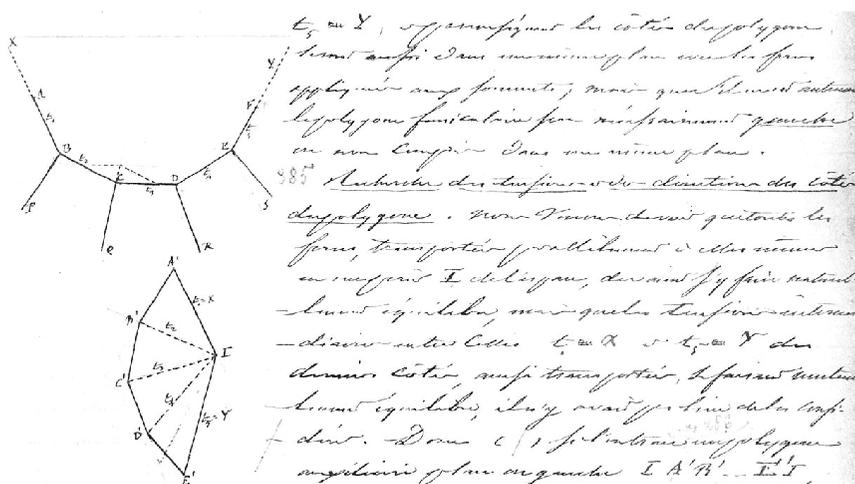


Figure 3. Le polygone funiculaire dans le cours inédit de Poncelet à la Sorbonne [1840–1841]

S'intéressant au polygone funiculaire du point de vue graphique, Poncelet renoue donc — consciemment si l'auteur a une connaissance directe des travaux de Varignon et de Camus, de façon « involontaire » s'il arrive tout seul aux résultats obtenus par ses deux prédécesseurs — avec une tradition vieille d'au moins un siècle, tradition qui avait été, entre-temps et suite à la création de l'École polytechnique, marginalisée, voire arrêtée dans sa marche, au profit d'une approche analytique de l'objet. Ce retour à un traitement graphique des questions relatives au polygone funiculaire ne semble pas être uniquement dû à la passion attestée de Poncelet pour les méthodes graphiques en général⁹. Il s'inscrit dans un contexte technologique particulier : le développement des ponts suspendus,

de l'École polytechnique [Poncelet 1840–1841].

⁹ Sur la place des méthodes graphiques dans l'œuvre mécanicienne de Poncelet, voir [Chatzis 1998] et [Chatzis 2002].

ouvrages d'art originaires des États-Unis, introduits en France à partir des années 1820 après avoir été adoptés par les Anglais ([Navier 1823], [Seguin 1826], [Picon 1992], [Cotte 1992]). Quelles sont les relations entre ce type d'ouvrage et le polygone funiculaire ?

Un pont suspendu est composé de deux chaînes (ou câbles métalliques) tirées par des tiges qui supportent le poids du tablier et celui dû à la circulation. Chaque chaîne (ou câble métallique) constituant ainsi un polygone funiculaire (au sens matériel du terme), l'introduction de ce type d'ouvrage en France s'accompagne de la publication de plusieurs études où le polygone funiculaire est abordé par voie analytique ([Lamé & Clapeyron 1828], [Jullien 1837], [Michal 1839]). En proposant un traitement graphique du polygone funiculaire, qu'il applique aussitôt à l'étude des ponts suspendus, Poncelet inscrit son geste dans un contexte plus large marqué par un intérêt croissant pour le polygone funiculaire tout en tranchant avec la littérature dominante de l'époque.

Les traitements graphiques que Poncelet consacre au polygone funiculaire, dispensés dans le cadre de ses activités professorales, vont, pour partie, connaître une certaine diffusion au-delà du cercle des auditeurs de son enseignement. Ainsi, le cours du soir adressé aux habitants de la ville de Metz est lithographié par les soins du capitaine du génie Gosselin [Poncelet 1827–1830]. Plusieurs parties de ce même cours, dont celle consacrée au polygone funiculaire, vont bénéficier par ailleurs d'un support de diffusion supplémentaire et quelque peu inattendu par l'intermédiaire d'une édition pirate, assurée par une maison d'édition liégeoise à l'extrême fin des années 1830 ([Poncelet 1839], [Maurer 1998, p. 103–104]). Il n'empêche que les calculs graphiques de Poncelet seront ignorés par la communauté des ingénieurs français, en tout cas par une fraction significative de celle-ci¹⁰. La statique graphique sera née et cultivée ailleurs, en Suisse

¹⁰ Pourquoi les traitements graphiques de Poncelet n'ont-ils pas davantage intéressé ses contemporains ? Apportons ici un élément d'explication que nous avons trouvé dans un ouvrage signé par Lemoyne, ingénieur des ponts et chaussées [Lemoyne 1825]. Alors que Poncelet s'applique à remplacer des calculs analytiques compliqués par des constructions graphiques, d'autres ingénieurs produisent à la même époque, au sujet des ponts suspendus, des tables numériques facilement utilisables par les praticiens. Poncelet, en commentant lui-même l'accueil mitigé que les praticiens avaient réservé à ses différents travaux graphiques, déclare que les ingénieurs français de la première moitié du XIX^e siècle « préfèrent encore des tables numériques » aux constructions graphiques [Chatzis 1998, p. 82]. Cette explication sera reprise et développée plus loin,

d'abord où travaillait Culmann, en Allemagne et en Italie à titre principal ensuite. Elle commencera à se diffuser lentement en France à partir des années 1870.

II. LE PROCESSUS DE DIFFUSION DE LA STATIQUE GRAPHIQUE EN FRANCE DURANT LE DERNIER TIERS DU XIX^e SIÈCLE

1. Contenu et aspects temporels de la diffusion de la statique graphique en France durant le dernier tiers du XIX^e siècle

Trois périodes scandent l'histoire de la réception de la statique graphique en France à partir des années 1870 :

- * une première période de dix ans qui va de 1866, date de publication de l'ouvrage de Culmann, *Die graphische Statik*, à 1876, pendant laquelle la statique graphique reste pratiquement inconnue en France ;

- * une deuxième période allant de 1877 au milieu de la décennie suivante, pendant laquelle les Français se familiarisent avec la nouvelle science, essentiellement à travers une série de traductions, mais aussi grâce à quelques productions nationales ;

- * une troisième période, enfin, qui commence vers 1885 et se prolonge jusqu'aux premières années du XX^e siècle, et qui marque la fin de l'exception française en matière de statique graphique : des auteurs français écrivent plusieurs traités de statique graphique et introduisent massivement celle-ci dans l'enseignement technique comme partie intégrante de la résistance des matériaux.

Reprenons chaque période séparément.

** Période 1866–1876.*

« En Angleterre et en Allemagne, les ingénieurs mettent à profit les méthodes géométriques beaucoup plus souvent qu'on ne le fait en France [...]. Il est à désirer que ces procédés, souvent fort expéditifs, prennent dans l'enseignement de nos écoles scientifiques et dans la pratique des bureaux d'ingénieurs plus de place qu'ils n'en occupent maintenant. L'ouvrage de M. Culmann mérite, à ce point de vue, l'examen le plus attentif de la part des hommes compétents [...]. Un ouvrage aussi sérieux ne saurait être convenablement apprécié en quelques lignes. J'ai voulu seulement aujourd'hui appeler l'attention sur le traité de M. Culmann, ingénieur distingué et professeur habile d'une école justement appréciée » [Collignon 1868, p. 224–225].

dans la section 3 de l'article.

C'est ainsi qu'Édouard Collignon, à l'époque professeur adjoint de mécanique générale à l'École des ponts et chaussées, saluait la parution du *Die graphische Statik*, signé par son homologue allemand. Les vœux de l'auteur ne seront pas exaucés. Dix ans après la parution de l'ouvrage de Culmann, les manifestations de la statique graphique en France se comptent sur les doigts d'une seule main. Si l'on fait exception d'un second compte rendu, signé toujours par Collignon et signalant élogieusement au public des *Annales des ponts et chaussées* l'existence d'une brochure allemande consacrée aux origines et à l'histoire de la statique graphique [Collignon 1875], la moisson de cette période est très mince : nous n'avons inventorié que trois publications, à savoir deux ouvrages et un article.

La première publication est la traduction d'un livre de Franz Reuleaux, le célèbre mécanicien allemand [Reuleaux 1873]. Consacré aux questions relatives à la construction des organes des machines, le livre s'adresse, à titre principal, à des ingénieurs-mécaniciens et ne constitue pas un ouvrage de statique graphique proprement dit. Il comporte néanmoins une partie où l'on trouve une présentation des notions de la *graphostatique*, d'après la traduction adoptée, et quelques applications de cette science aux centres de gravité, aux poutres reposant sur deux appuis et aux systèmes articulés (charpentes), c'est-à-dire aux structures qui sont composées de plusieurs barres, en bois ou en métal, assemblées autour des points d'attache (les nœuds), qui sont chargés des forces extérieures.

La deuxième publication traitant de la statique graphique dans cette période est un article paru dans les *Annales industrielles* en 1873 [Pichault 1873]. La statique graphique (*statographie* selon les termes de l'auteur de l'article) figure ici en tant qu'exemple, parmi d'autres, illustrant l'intérêt du calcul graphique en général pour résoudre de façon efficace et simple des problèmes relevant de domaines aussi divers que l'arithmétique et l'algèbre, la géométrie et la mécanique [. . .] De caractère programmatique, visant à faire entrevoir aux praticiens les potentialités pratiques de la statique graphique, l'article, à l'instar de l'ouvrage précité de Reuleaux, expose les principes de base et traite de quelques applications simples de cette nouvelle science : centres de gravité, moments d'inertie d'une surface plane, poutres isostatiques¹¹ chargées de différentes façons [. . .]

¹¹ Systèmes isostatiques : des structures dont les réactions des appuis et les efforts

La troisième publication française relative à la statique graphique prend cette fois la forme d'un traité. Écrit par Maurice Lévy [1874], ingénieur des ponts et chaussées et futur académicien, scientifique de renom international [Charlton 1982, p. 51–54, 87–89, 94–105], le traité en question sort en 1874, marquant un retard de huit ans sur le livre de Culmann. Rapidement épuisé en France, mieux vendu en dehors de l'Hexagone qu'à l'intérieur de celui-ci, selon le témoignage d'un contemporain [Flamant 1886], le traité de Lévy constitue, pour la période 1866–1876, le seul document en France qui prend la statique graphique comme objet propre. Seul représentant français au milieu d'une production qui commence à se faire abondante, il n'en semble pas moins bénéficier d'une excellente réputation internationale, comme en témoigne la citation suivante :

« As regards the development abroad, mention should be made of the labours of Culmann, Cremona et Von Ott; and in a more special manner of those of Maurice Levy, who, on account of the clearness and lucidity of his style, has contributed, perhaps more than any other writer, to the spread of the science of Graphic Statics » [Graham 1883, p. viii].

Tout en dotant son traité d'une partie théorique où l'on trouve quelques notions préliminaires relatives au calcul graphique et un exposé purement géométrique des polygones funiculaires et des figures réciproques, Lévy, contrairement à Culmann, n'accorde dans son livre aucune place à la géométrie de position ou géométrie supérieure (il s'agit là d'appellations courantes à l'époque pour la géométrie projective). Cette absence de référence à la géométrie de position sera, on le verra, un trait constant de toute la production française en matière de statique graphique. Si l'on se place du point de vue des applications de cette dernière, force est de constater que le livre de Lévy, nettement plus riche que l'ouvrage de Reuleaux ou l'article de Pichault, ne traite que des questions les plus simples : centres de gravité, moments d'inertie, poutres reposant sur deux appuis, arcs isostatiques et systèmes articulés. Ni la question des charges mobiles, ni les systèmes hyperstatiques (les poutres continues par exemple), ne sont abordés par l'auteur.

Dix ans après la parution du livre de Culmann, et en dépit des travaux d'Otto Mohr (1835–1918) et d'autres auteurs qui avaient élargi

internes (moments de flexion...) peuvent être calculés à l'aide des seules équations de la mécanique rationnelle. En revanche, la même étude des systèmes hyperstatiques nécessite l'introduction des déformations élastiques.

dès la fin des années 1860 le champ des applications de la statique graphique ([Maurer 1998], [Gerhardt 2002]), le public français garde incontestablement une vision réduite de la nouvelle science.

* *Période 1877–1885*. — Même si le retard français n'est que partiellement comblé pendant cette période¹², les années 1877–1885 offrent en matière de statique graphique un tableau nettement plus riche.

Les traductions des ouvrages consacrés à la nouvelle science se multiplient d'abord. Ainsi, en 1877, Ch. d'Espine, ingénieur civil et ancien élève de l'École polytechnique de Zurich, traduit de l'allemand le premier tome du traité classique sur les ponts d'Emil Winkler, professeur à l'École polytechnique de Vienne [Winkler 1877]. Le lecteur français y trouvera pour la première fois, et avec un retard de dix ans, un traitement détaillé des poutres continues à l'aide des méthodes de la statique graphique. En 1882, on enregistre la traduction de l'allemand, signée par des ingénieurs civils toujours, de deux autres ouvrages de statique graphique élémentaire, tournés également vers les applications, constructions civiles et mécanismes respectivement ([Maurer 1882], [Hermann 1882]).

À côté de ces ouvrages qui abordent les diverses applications de la statique graphique sans préliminaires théoriques, des ouvrages de haut niveau mathématique font également leur apparition sur le marché français pendant cette période. En 1879, l'ingénieur civil Paul Terrier, ancien élève de l'École centrale des arts et manufactures, traduit de l'italien le premier volume du traité de statique graphique d'Antonio Favaro, professeur à l'université de Padoue. Ce volume est consacré à la *Géométrie de position* [Favaro 1879]¹³. L'année suivante, en 1880, deux ingénieurs des ponts et chaussées, épaulés par un ingénieur civil, assurent

¹² On peut utiliser comme indicateur de ce retard, le nombre de publications françaises parmi l'ensemble de publications en matière de statique graphique dans des listes bibliographiques établies par des auteurs de l'époque ainsi que les historiens contemporains, comme Hele Shaw [1890], Henneberg [1909] et Maurer [1998].

¹³ Notons que l'ouvrage de Favaro, comportant au total trois parties (*Géométrie de position, Principes de calcul graphique, Statique graphique proprement dite*), a fait, lors de sa sortie en Italie en 1877, l'objet d'une longue note élogieuse signée par Collignon dans les *Annales des ponts et chaussées* [1877a]. Il a été recensé également par Chasles dans les *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences* [1877] (le même auteur recense dans les *Comptes rendus* quelques autres livres sur la statique graphique).

collectivement la traduction de l'ouvrage fondateur de Culmann d'après la deuxième édition de 1875 [Culmann 1880]. À l'extrême fin de notre période, en 1885, voient enfin le jour en français le deuxième volume du traité de Favaro [1885], portant sur le calcul graphique, et, avec treize ans de retard par rapport à l'édition originale, le livre classique de Luigi Cremona sur les figures réciproques en statique graphique, traduit par un capitaine du génie [Cremona 1885].

Riche en traductions, la période 1877–1885 est marquée également par une production d'origine française bien plus abondante que par le passé. Représentée jusqu'alors, pour l'essentiel, par le seul nom de Lévy, la scène nationale en matière de statique graphique vient s'enrichir d'autres auteurs.

Deux ingénieurs des ponts et chaussées, présidant aux destinées de la mécanique générale et de la mécanique appliquée à l'École des ponts et chaussées tout au long de la seconde moitié du XIX^e siècle, Édouard Collignon et le fameux Jacques-Antoine-Charles Bresse [Timoshenko 1953, p. 146–152], introduisent quelques chapitres de statique graphique, essentiellement la partie concernant les systèmes articulés, dans les rééditions de leurs traités de résistance des matériaux ([Collignon 1877b], [Bresse 1880]). Le même Collignon introduit également quelques éléments de statique graphique dans la seconde édition de son *Traité de mécanique* [Collignon 1881, p. 626–636]. Quant à Bresse, il signe en 1877 un article dans les *Annales des ponts et chaussées*, où l'on trouve une application de la statique graphique à la détermination des moments fléchissants qui se produisent dans une poutre à deux appuis lors du passage d'un convoi. Il s'agit d'un cas de découverte simultanée, puisque le signataire de l'article se rend compte au moment de la publication qu'une solution semblable à la sienne avait déjà été donnée par Culmann dans la seconde édition de sa *Statique graphique* (1875). Une telle contribution, couverte de l'aura de son auteur, n'en renforce pas moins l'intérêt envers la nouvelle science qui gagne la France pendant cette période, d'autant plus que Bresse, dans le travail en question, procède à une comparaison entre la solution graphique et la solution analytique du problème, et montre, chiffres à l'appui, que « [l]a plus grande erreur relative commise dans nos évaluations par la méthode graphique n'atteint donc pas $\frac{1}{40}$, et nous croyons que cette approximation serait suffisante dans la pratique » [Bresse 1877, p. 328].

L'article de Bresse sera repris plus tard par un autre ingénieur du même corps, Jean Résal [1885, p. 513–518], professeur de résistance des matériaux à l'École des ponts et chaussées. Cependant, les contributions les plus importantes de cette période, tant en nouveauté qu'en quantité, ne proviennent pas des ingénieurs des ponts et chaussées, mais de leurs subordonnés et de deux ingénieurs civils, diplômés de l'École centrale des arts et manufactures.

En 1877, Victor-Joseph Williot, conducteur des travaux¹⁴, publie une application détaillée de la statique graphique aux systèmes articulés [Williot 1878]. Dans ce travail, tourné vers les applications et ne comportant aucune discussion théorique sur les figures réciproques, Williot propose également une méthode originale pour calculer graphiquement les déformations des éléments composant un système articulé, méthode qui fera une carrière internationale ([Salmon 1938, p. 26–27], [Charlton 1982, p. 70–71]). Notons ici que la contribution peut-être la plus connue et la plus populaire sur le plan international signée par un Français dans le domaine de la statique graphique est le fruit d'un technicien qui n'a même pas le titre d'ingénieur. C'est toujours un technicien, le sous-ingénieur des travaux Victor Guillaume, qui va produire, en 1885, dans les colonnes des *Annales des ponts et chaussées*, un texte très fourni et très opérationnel sur les applications de la statique graphique à l'étude des poutres continues et des arcs (à section variable et à section constante) [Guillaume 1885].

Nous ne pouvons pas quitter cette période (1877–1885) sans mentionner les contributions de deux ingénieurs civils, sortis de l'École centrale des arts et manufactures. Ainsi P. Laurent s'applique, dans une série d'articles parus dans *Le génie civil*, à exposer à ses confrères les principes et l'intérêt de la statique graphique [Laurent 1882–1883], alors que Bertrand de Fontviolant, protégé de Lévy et futur professeur de mécanique appliquée à l'École centrale, à l'époque engagé à la Compagnie du chemin de fer du Nord, présente, en 1885, devant la Société des ingénieurs civils, ses solutions analytiques et graphiques du calcul des poutres continues datant de l'année précédente [Fontviolant 1884]. Fontviolant propose notamment une simplification de la solution graphique donnée, en 1868, par Mohr au problème des poutres continues.

¹⁴ Sur les conducteurs des travaux et leurs rapports avec leurs supérieurs hiérarchiques, les ingénieurs des ponts et chaussées, pendant le XIX^e siècle, voir [Weiss 1995].

Après une période de long silence, l'année 1877 marque un tournant dans la réception de la statique graphique en France. À partir de cette date, les traductions se multiplient (remarquons toutefois l'absence de livres dus à des auteurs de langue anglaise dans les traductions) et il en va de même pour les productions nationales. Même si les ingénieurs des ponts et chaussées participent à la réception de la statique graphique en France, ce sont surtout des ingénieurs civils, voire des techniciens qui n'ont pas le titre d'ingénieur, qui sont les vecteurs les plus actifs de la transmission de la nouvelle science. Notons enfin que vers le milieu des années 1885 toutes les facettes, théoriques et pratiques, de la statique graphique sont connues des Français, qui disposent désormais à la fois d'ouvrages tournés essentiellement vers les applications et d'autres textes, exclusivement des traductions, qui accordent une place importante à la géométrie de position comme fondement théorique de la statique graphique.

* *Période 1886–1900.* — La période qui va du milieu des années 1880 aux premières années du XX^e siècle marque la « normalisation » des rapports entre la statique graphique et la France.

D'abord, les traductions diminuent au profit d'ouvrages écrits par des auteurs français. Ainsi, on n'enregistre, pendant cette période, que la traduction de deux ouvrages de langue allemande, tournés toujours vers les applications ([Ritter 1886], [Müller-Breslau 1886]), traduits par deux ingénieurs civils qui s'avéreront très actifs dans la promotion de la statique graphique en France. Il s'agit de Maurice Koechlin, ancien élève de l'École polytechnique de Zurich, ingénieur de la maison Eiffel et concepteur de la fameuse Tour, et de Théophile Seyrig, centralien, sorti major de la promotion 1865 et directeur du bureau d'études de la Société Eiffel & Cie pendant la période 1868–1879 ([Lemoine 1984], [Ribeill 1996], [Carmona 2002]). Comme on le verra, ces deux auteurs, outre leur œuvre de traducteur, vont produire des traités de statique graphique, qui, promus au rang de classiques, vont connaître plusieurs éditions.

Cette diminution du nombre des traductions sera amplement compensée par une production nationale qui ira croissant et dont les produits peuvent être regroupés en deux catégories.

La première comporte des ouvrages et des articles « spécialisés », car consacrés uniquement aux méthodes de la statique graphique et à leur

application à des problèmes pratiques ([Koechlin 1889], [Seyrig 1898], [Thiré 1888], [Hausser & Cunq 1885, 1886], [Rouché 1889]). Écrits pour l'essentiel par des ingénieurs civils, ces ouvrages, dont certains vont connaître plusieurs éditions, sont sensibles à des problèmes opérationnels, et comportent plusieurs conseils d'ordre pratique (sur la façon de tracer les épures, par exemple).

La deuxième catégorie d'ouvrages traitant de la statique graphique est composée de traités de résistance des matériaux. En grande partie produits par des ingénieurs des ponts et chaussées qui enseignent le plus souvent la mécanique générale et appliquée dans les grandes écoles d'ingénieurs de l'époque, ces traités font cohabiter la statique graphique avec des méthodes analytiques ([Flamant 1909], [Réal 1898, 1901], [Planat 1887], [Arnal 1898]). Parmi les ouvrages appartenant à cette catégorie, le traité de statique graphique de Lévy, profondément remanié et édité, en quatre volumes, entre 1886 et 1888 (l'ouvrage va connaître une troisième édition à partir de 1907), mérite une mention particulière ([Lévy 1886–1888], [Flamant 1886, 1888]). Dans cette somme traitant de toutes les questions relatives à la résistance des matériaux, Lévy, auteur lui-même de plusieurs contributions en la matière, donne pour chaque problème, de façon systématique, les solutions analytiques et les solutions graphiques disponibles. Lévy ne sera pas le seul auteur français à innover dans le champ de la statique graphique pendant cette période. Fontviolant signera également plusieurs contributions originales en matière de traitement graphique des arcs [Fontviolant *s.d.*]. Donnant lieu à une série de comptes rendus à l'Académie des sciences, les contributions de l'auteur ne semblent pas avoir trouvé, pour autant, de large écho parmi les professionnels.

Cette période allant du milieu des années 1880 aux premières années du XX^e siècle est marquée aussi par l'entrée progressive de la statique graphique dans l'enseignement technique comme partie intégrante du cours de résistance des matériaux [Belhoste & Chatzis 1998]. Avec un retard, souvent de quinze ans, par rapport aux autres pays européens¹⁵,

¹⁵ Pour donner une idée du retard avec lequel la statique graphique a pénétré dans l'enseignement technique en France, donnons quelques informations concernant d'autres pays. Vers 1875, la carte d'enseignement de la statique graphique se dessine comme suit. *Suisse* : la statique graphique est professée à Zurich; *Autriche* : elle est professée à Vienne, à Prague, à Graz et à Brno; *Allemagne* : il y a deux cours de statique

la France commence, à partir du milieu des années 1880, à intégrer progressivement la statique graphique dans tous les niveaux d'enseignement technique, des écoles professionnelles jusqu'à la filière polytechnicienne. Après avoir reçu le baptême d'enseignement dans des lieux institutionnels aussi contrastés que le Collège de France et le Conservatoire national des arts et métiers¹⁶, la statique graphique est introduite vers 1885 dans les écoles d'application de l'École polytechnique telles que l'École de l'artillerie et du génie [Petit 1885] et l'École des ponts et chaussées ([Arnal 1898], [Résal 1898, 1901]), et à l'École centrale des arts et manufactures [Guillet 1929]. À la fin du XIX^e siècle et au début du siècle suivant, la statique graphique sera également enseignée dans des écoles d'ingénieurs de niveau moyen, telles que les écoles nationales d'arts et métiers, ainsi que dans divers instituts techniques, créés par les universités au tournant des XIX^e et XX^e siècles dans le but de fournir à l'industrie mécanique et électrique des ingénieurs spécialisés [Belhoste & Chatzis 1998], sans oublier les écoles d'architecture [Bourlet 1902]. Dans les années 1910, la statique graphique sera enseignée dans des établissements aussi différents que l'École polytechnique, dans le cadre du cours de géométrie [Ocagne 1920], et les écoles pratiques de commerce et d'industrie (enseignement secondaire), dans le cadre du cours de mécanique industrielle [Gouard & Hiernaux 1910]. Notons que c'est dans les grandes écoles d'ingénieurs, telles que l'École des ponts et chaussées, que la présentation de la statique graphique, doublée d'un enseignement poussé des méthodes analytiques en matière de résistance des matériaux,

graphique à Berlin, l'un à la Gewerbe-Akademie (cours de mécanique, obligatoire), l'autre à la Bau-Akademie (cours spécial, facultatif) ; en dehors de ces établissements, la statique graphique est enseignée à Aix-la-Chapelle, à Karlsruhe, à Darmstadt, à Munich, à Dresde, à Hanovre et à Stuttgart ; *Russie* : cours de statique graphique à l'École polytechnique de Riga ; *Italie* : introduite à la fin des années 1860 à Milan et au début des années 1870 à Padoue, la statique graphique est enseignée à partir des années 1875 dans les écoles techniques de Turin, de Naples, de Rome et de Palerme, et dans les facultés de Pise, de Bologne et de Pavie [Collignon 1877a, p. 567-568]. Pour les derniers tiers du XIX^e siècle et les premières années du XX^e siècle, voir [Maurer 1998].

¹⁶ Lévy a dispensé un cours de statique graphique, « à titre très exceptionnel » d'après ses dires, au Collège de France durant l'année 1884-1885 (voir sa lettre du 22 novembre 1884 adressée au rédacteur en chef et publiée dans *Le génie civil* [1884-1885, p. 83]). Dans son cours, Lévy a fait connaître au public français les travaux classiques en matière de statique graphique des arcs dus à Henry Turner Eddy [1877] (sur le cours de Lévy, voir *Le génie civil*, 1885, p. 111). C'est Eugène Rouché, polytechnicien, professeur titulaire de la chaire de géométrie descriptive, qui est l'auteur du cours sur la statique graphique donné, en 1884-1885 toujours, au Conservatoire national des arts et métiers.

est la plus complète : contrairement à une opinion répandue parmi les historiens, l'opposition grande école d'ingénieurs/école technique de niveau moyen n'est pas, pour ce qui concerne la résistance des matériaux du moins, parallèle à l'opposition analyse/méthodes géométriques.

2. *Quelle statique graphique en France? Conceptions et débats*

Le fait que la statique graphique soit diffusée en France surtout par des ingénieurs civils versés dans la pratique, ainsi que le fait qu'elle soit enseignée principalement dans les cours de résistance des matériaux, sont en eux-mêmes des indices de la façon dominante dont les Français conçoivent cette méthode de calcul graphique. Dans ce qui suit, nous essaierons d'établir une carte plus détaillée des débats qui ont accompagné sa réception en France.

Première remarque majeure : la statique graphique ne connaît pas d'adversaires déclarés. Du bas en haut du monde technique, du conducteur des travaux au polytechnicien, l'accord sur les avantages de la nouvelle méthode est unanime : les techniques graphiques sont censées permettre de résoudre d'une façon simple et élégante, avec toute l'exactitude souhaitable, la plupart des problèmes que pose quotidiennement à l'ingénieur l'art des constructions. Qui plus est, contrairement au calcul numérique qui peut être facilement affecté d'erreurs, les procédés graphiques, en devant satisfaire plusieurs vérifications (visuelles), rassurent les praticiens. Dans la France du dernier tiers du XIX^e siècle, on n'enregistre pas d'opposition, au moins ouverte, à la statique graphique.

Deuxième remarque majeure : la statique graphique est considérée presque unanimement en France comme *un instrument, un ensemble de techniques*, permettant, ici et maintenant, aux ingénieurs de résoudre de façon efficace les divers problèmes qu'ils rencontrent dans leur vie professionnelle. Considérée comme une « science d'application » empruntant ses principes à la statique et dépourvue par conséquent de principes propres, la statique graphique est placée en France sous le signe de l'utilité et de l'application immédiate. Ses adeptes français se reconnaissent dans les propos de Lévy, qui donne le ton dès le début du processus de réception de la nouvelle science :

« La Statique graphique, malgré la parfaite rigueur de ses procédés, ne constitue, pour nous, qu'une application très heureuse et extrêmement utile des méthodes combinées de la Géométrie moderne et de la Statique, mais elle n'ajoute de principe véritablement nouveau ni à l'une ni à l'autre de ces sciences [...]. Ce qui lui a valu,

à juste titre, d'être érigée en corps de doctrine, ce sont ses applications; aussi [...] avons-nous cherché à lui laisser son caractère de science d'application, ne prétendant nullement à empiéter sur le domaine de la Statique, dont elle emprunte les principes » [Lévy 1874, p. vi-vii].

Proches des Allemands sur ce point, les Français ne ressentent pas le besoin d'associer le sort de la statique graphique à celui de la géométrie supérieure (géométrie de position ou géométrie projective). Ils ne suivent pas les fondateurs de la nouvelle science, Culmann et Cremona, ou des auteurs tels que Favaro¹⁷, qui voient dans la statique graphique, comme dans les procédés géométriques modernes, une démarche intellectuelle, une gymnastique de l'esprit, dont la valeur pour la formation de l'ingénieur transcende l'utilité immédiate. Cette conception utilitaire de la statique graphique amène Lévy à supprimer, lors de la deuxième édition de son ouvrage, la partie géométrique de la première édition, pourtant peu développée.

« Cette marche [commencer par la partie géométrique] nous paraît encore aujourd'hui la plus satisfaisante au point de vue didactique; mais, comme il s'agit d'arriver le plus rapidement possible aux applications, nous avons pensé que les Ingénieurs nous sauraient gré de les dispenser de cette étude préalable. Nous avons donc entièrement supprimé la partie géométrique de la première édition et nous déduisons la solution des problèmes relatifs aux polygones funiculaires et aux figures réciproques, de leur définition mécanique même » [Lévy 1886-1888, Préface, p. v].

Le rattachement final de la statique graphique au cours de résistance des matériaux n'est somme toute que la conclusion logique de cette vision utilitaire de la statique graphique.

Demandant aux méthodes de la statique graphique un rendement immédiat, les Français ne sont pas pour autant des puristes : à quelques exceptions près comme celle de Seyrig¹⁸, personne ne demande une

¹⁷ « [...] nous partageons sans réserve l'aversion de Chasles à l'égard des 'lambeaux de théories qui ont pour objet suprême et immédiat des applications pratiques', et nous pensons, avec l'éminent géomètre, que cette fâcheuse tendance est 'essentiellement contraire à l'esprit et au but des mathématiques'. [...] La Statique graphique doit donc prendre des fondements dans les théories aussi générales que rigoureuses de la Géométrie moderne », déclare Favaro [1879, p. xxxi-xxxii].

¹⁸ « Nous avons limité à dessein nos explications aux systèmes statiquement déterminés, et cela, non pas uniquement par manque de place. Nous avons évité de parler de tout système où les considérations de l'élasticité, de la flexion élastique, doivent intervenir pour le calcul des efforts intérieurs. Ces systèmes-là peuvent sans doute s'étudier à l'aide de la statique graphique, mais il faut faire usage de considérations et de théories analytiques. Or, pour nous, le grand, le principal mérite de cette science, c'est sa simplicité, son application directe, visible en quelque sorte, à la construction. Dès

séparation radicale des méthodes algébriques et des méthodes graphiques. Au contraire, tout le monde prône leur usage simultané comme moyen de vérification.

Notons également que si personne ne s'oppose à la statique graphique, un certain attachement aux méthodes analytiques est aussi observé, surtout parmi les ingénieurs sortis des grandes écoles. Ainsi, Fontviolant, pourtant auteur des solutions graphiques originales portant sur les poutres continues et les arcs, considère

« [...] qu'au point de vue théorique, il convient toujours d'attaquer un problème quelconque relatif à la flexion plane, par l'analyse, qui seule fournit des solutions applicables à tous les cas, et met mieux en lumière les rapports, les relations des divers éléments qui entrent dans la question proposée » [Fontviolant 1884, réimpr., vol. 1, p. 289].

On trouve des positions similaires sous la plume de deux ingénieurs des ponts et chaussées, Collignon [1877b, 3^e éd., p. 316] et Résal [1889, p. xlv]. Certains trouvent par ailleurs que les méthodes analytiques surclassent également les méthodes graphiques comme méthodes d'exposition des résultats : à les en croire,

« [...] les calculs et les raisonnements s'enchaînent suivant un ordre linéaire obligatoire tandis qu'une construction géométrique une fois faite, pour peu qu'elle soit complexe, présente à la lecture la difficulté d'un écheveau à débrouiller » [Collignon 1877b, 3^e éd., p. 317].

3. Tentatives d'interprétation du processus de diffusion de la statique graphique en France

Après avoir caractérisé, dans ses grandes lignes, le mouvement de réception de la statique graphique en France durant le dernier tiers du XIX^e siècle, nous voudrions conclure la seconde partie de notre article en proposant quelques éléments d'interprétation de l'accueil réservé par les Français à la nouvelle science. Nous ne traiterons que de deux aspects significatifs du mouvement, à savoir :

* l'absence de toute référence de la part des Français à la géométrie de position (géométrie projective), ce qui ne va pas sans renforcer leur vision de la statique graphique en tant que « science d'application » ;

* le « retard français » en matière de statique graphique.

L'absence de référence à la géométrie de position reflète, à notre sens, la

qu'elle n'est plus que l'interprétation d'une formule, elle dévie de son but » [Seyrig 1898, t. 1, p. 6].

place de la géométrie projective dans l'enseignement supérieur en France. Rappelons qu'au moment où la statique graphique arrive en France, il n'y a qu'un cours de géométrie supérieure à la Sorbonne, donné par Chasles (1793–1880), détenteur de la chaire fondée en 1846. Plusieurs acteurs de l'époque, ingénieurs et mathématiciens, insistent sur le peu de place qu'occupe, par rapport à d'autres pays, tels que l'Italie par exemple, la géométrie projective dans la formation des ingénieurs français ([Flamant 1886], [Rouché & Comberousse 1883, 1888])¹⁹.

Pour ce qui est de la lenteur de la diffusion, rappelons tout d'abord que la statique graphique est née juste quelques années avant que la guerre de 1870 n'éclate entre la France et l'Allemagne. Considérée aux yeux de beaucoup comme une science allemande, la statique graphique souffre peut-être d'une hostilité de la part des Français, au moins dans les premières années qui suivent les blessures causées par la défaite²⁰. Ce n'est pas un hasard si plusieurs auteurs français, tels que Lévy et Bresse, voulant promouvoir la « nouvelle science » dans leur pays, insistent sur le fait que la statique graphique, loin d'être une science allemande, a des pères fondateurs français comme Poncelet et Chasles.

Mais laissons les hypothèses un peu livresques pour nous diriger sur un terrain plus sûr. Pour un acteur, toute réception se fait au croisement de certaines expériences et de certaines attentes, elle s'inscrit dans un horizon antécédent avec ses normes et ses besoins, elle est conditionnée par les intérêts que l'acteur poursuit, les pratiques qu'il met en œuvre et les ressources dont il dispose déjà ([Jauss 1978], [Warwick 1992–1993]).

Comment la statique graphique s'insère-t-elle alors dans l'horizon de la communauté des ingénieurs français²¹, et notamment dans l'horizon de ceux qui sont socialement et intellectuellement les mieux placés pour assurer l'accueil et la diffusion de la nouvelle discipline (nous pensons

¹⁹ Sur le paysage mathématique de l'époque en France, et la place qu'y occupait la géométrie, on peut se reporter à [Gispert 1991].

²⁰ Sur le traumatisme causé par la défaite auprès des intellectuels français, voir [Digeon 1959].

²¹ En parlant de la communauté des ingénieurs français au singulier, nous n'ignorons pas les différences (souvent substantielles) qui traversent cette communauté. Mais en ce qui concerne la statique graphique, ces différences ne semblent pas avoir affecté de façon significative la manière dont les différentes fractions de la communauté ont accueilli la nouvelle science.

ici aux ingénieurs diplômés des établissements prestigieux de l'époque)? Que les ingénieurs français sortis des grandes écoles soient imbus à cette époque de culture analytique est un fait avéré. On comprend que les normes et les valeurs dominantes du milieu réceptif ne favorisent pas nécessairement la diffusion rapide des méthodes géométriques. Mais il y a plus encore. Il se trouve que, dans les années 1870, les ingénieurs français sont moins motivés que leurs collègues étrangers pour faire appel aux services de la statique graphique. En effet, depuis l'époque où Benoît-Paul-Émile Clapeyron (1799–1864) et Bresse ont traité de façon analytique la question des poutres continues et des arcs, dans les années 1850–1860 ([Clapeyron 1857], [Bresse 1854, 1865]), beaucoup d'efforts ont été entrepris, par Bresse lui-même entre autres, pour mettre leurs résultats théoriques au service des praticiens sous une forme facilement exploitable. L'ingénieur français dispose ainsi, dans les années 1870, de plusieurs tables numériques pour le calcul des arcs et pour celui des poutres continues²². Il dispose également des formules d'approximation et des *solutions graphiques* des équations de Clapeyron (théorème des trois moments) donnant les moments de flexion développés dans une poutre continue, solutions dues à deux polytechniciens, Collignon et Georges-François Fourret ([Collignon 1865], [Collignon 1877b], [Fourret 1876], [Flamant 1909]). Il y a en France une autre tradition graphique, qui ne fait pas appel au polygone de forces et au polygone funiculaire, mais qui s'applique à résoudre de façon géométrique les équations relatives à la résistance des matériaux, tradition toujours vivante dans les années 1880 ([Collignon 1885], [Laurent 1884–1885], [Lévy 1886–1888]). Armés de tables numériques et de solutions graphiques des équations mathématiques, les ingénieurs français (ou au moins une certaine classe d'ingénieurs) sont moins enclins de recourir à la statique graphique pour traiter de la question des poutres continues et des arcs. On peut expliquer ainsi le fait que les parties de la nouvelle

²² Sur l'importance pratique des tables numériques de Bresse en matière de calcul d'arcs, voici par exemple le jugement de Karl Pearson : «*It [Bresse 1854] contains a very complete discussion of the problem, and Bresse's tables are of considerable value in testing any proposed circular arch. At the same time the graphical methods of Eddy are of more general application and would probably be now-a-days adopted, at least as a method of verification and comparison*» [Todhunter & Pearson 1893, vol. 2, part I, p. 352].

science traitant de ces questions sont diffusées en France plus tardivement que les parties consacrées aux systèmes articulés, pour lesquels les ingénieurs français ne disposaient pas de substituts aux méthodes de la statique graphique.

CONCLUSION GÉNÉRALE

L'objectif principal de cet article consistait en l'étude du processus de diffusion (tardive) de la statique graphique en France durant le dernier tiers du XIX^e siècle (partie II de l'article). Après avoir dessiné les grandes lignes de la réception par les ingénieurs français de ce secteur du calcul graphique pendant cette période (sections 1 et 2), nous avons essayé, dans un passage qui, par rapport à la présentation du processus de diffusion, tenait lieu de conclusion (section 3), de fournir quelques éléments d'explication de l'accueil réservé à la statique graphique en France.

Ne voulant pas répéter, même en les développant davantage, des analyses déjà livrées au lecteur, nous préférons saisir le lieu de la conclusion générale pour aborder, ne serait-ce que sommairement et de façon exploratoire, une question qui est restée jusqu'ici en suspens. Nous avons mentionné, dans la première partie de l'article, les nombreuses naissances avortées de la statique graphique en France, de Varignon à Poncelet, mais sans analyser les raisons pour lesquelles la communauté des ingénieurs, en France mais aussi à l'étranger, avait oublié une grande partie de ces contributions, au point de considérer que la statique graphique ne démarrait, pour l'essentiel, qu'avec Culmann. Dans cette conclusion, nous aimerions, à partir de ce cas d'oubli particulier, aborder la question plus générale de l'amnésie qui peut frapper une communauté concernée par un champ de savoirs au cours de son histoire et réfléchir sur les divers facteurs susceptibles de favoriser un tel phénomène.

Plus précisément, comment les différentes formes de transmission de savoirs affectent-elles les relations que la communauté concernée entretient avec le passé et l'histoire du champ? Quel est le potentiel d'oubli dont les différentes formes de transmission sont porteuses? Nous souhaitons livrer au débat la thèse suivante : la montée en puissance, dans la première moitié du XIX^e siècle, du traité (le manuel) comme mode de transmission de savoirs relatifs au métier de l'ingénieur avec la mise en place du « système polytechnicien » (École polytechnique plus écoles d'application) modifie de

façon décisive les relations que la communauté des ingénieurs entretient avec l'histoire et le passé de ces savoirs²³. À notre sens, la forme « traité »²⁴ se présente comme une opération à double face. Censé être, pour un champ de savoirs donné, un lieu de *mémoire et de sauvegarde* de l'essentiel des savoirs produits jusqu'alors et jugés encore valables par la communauté concernée, le traité risque fortement de rejeter, malgré lui, dans un *oubli* durable et difficilement réparé, tout savoir non inclus en son sein pour une foule de circonstances contingentes²⁵ (et en dépit du fait que le savoir en question peut être tout aussi valide, à l'aune des critères de sélection utilisés par l'auteur du traité, que les savoirs qui y figurent). En effet, à quoi bon s'intéresser au passé et à l'histoire du champ de savoirs par lequel on est concerné en tant que producteur ou utilisateur, si l'on est censé trouver « ici et maintenant » dans le traité tout le passé « valable » du champ (valable à l'aune des critères du présent). Du même coup, le traité participe à la transformation du passé et de l'histoire du champ en une sorte de musée où l'on peut visiter des choses certes respectables, mais qui ne participent plus à l'évolution du champ, tous les ingrédients nécessaires pour son développement futur se trouvant désormais réunis dans le traité (et dans d'autres supports, comme les publications spécialisées).

Pour rendre plus visibles les nouvelles relations instaurées par le traité entre un champ de savoirs à un moment donné et son histoire, procédons à une comparaison de la forme « traité » avec une autre forme de transmission de savoirs relatifs à l'art de l'ingénieur à l'œuvre durant la première moitié du XIX^e siècle : la réédition d'un « classique », qui intègre sous forme de notes et d'additions les nouvelles connaissances développées entre-temps. Deux ouvrages illustrent particulièrement bien, de par leur qualité, ce

²³ Les réflexions qui suivent s'appuient sur notre connaissance du monde des ingénieurs. Mais elles nous semblent, moyennant des périodisations différentes, pouvoir être appliquées aussi à d'autres communautés productrices et destinatrices de savoirs spécifiques. Sur les manuels de chimie, voir [Bensaude-Vincent et al. 2003].

²⁴ Tout le travail des historiens depuis une trentaine d'années montre la nécessité de prendre en considération la matérialité des supports par lesquels les savoirs sont rendus publics et circulent (voir par exemple [Chemla 1995]).

²⁵ Pour revenir à la statique graphique, nous avons vu, en effet, que les contributions de Poncelet sont déposées dans des cours soit lithographiés (Metz) soit restés inédits (Sorbonne). Leur oubli par des auteurs de traités relatifs au sujet s'explique en partie par le caractère plus ou moins confidentiel de ces supports de transmission (oralité de l'amphithéâtre, lithographie).

mode de transmission de savoirs. En 1819, Navier réédite le premier tome de *L'architecture hydraulique* de Bernard Forest de Bélidor (1693–1761), ouvrage paru pour la première fois entre 1737 et 1739 [Bélidor 1819]. Un demi-siècle plus tard, Navier lui-même subit le même sort que Bélidor, puisqu'une partie de ses *Leçons de mécanique appliquée* données à l'École des ponts et chaussées (publiées déjà une première fois en 1826 et une seconde fois deux ans après sa mort, en 1833) sont rééditées par les soins de son camarade de corps, Adhémar-Jean-Claude Barré de Saint-Venant, en 1864 [Navier 1864]. Ces deux ouvrages nous permettent de voir un autre type de rapports établis entre l'état présent d'un champ de savoirs et son histoire. Texte original d'un côté, notes, additions et appendices ajoutés, de l'autre, les différents moments de l'histoire du champ coexistent au sein du même livre, voire sur la même page. Le lecteur (membre de la communauté concernée par les savoirs véhiculés par le livre) a devant ses yeux à la fois ce qui est considéré comme valable au moment de la réédition de l'ouvrage et ce qui est vu désormais comme périmé. Le même lecteur est souvent informé aussi, grâce à des historiques qui peuvent être très circonstanciés, du chemin qui va du passé dépassé vers le présent qui le remplace. Pour les savants qui entreprennent un tel travail de réédition, le « passé » du champ fait en quelque sorte partie de son « présent » puisqu'il est envisagé comme source d'inspiration pour son développement « futur »²⁶. Du coup, la familiarisation avec l'histoire du champ est une opération relevant de l'activité ordinaire du savant et les risques d'oublier des pans entiers du passé de son champ d'activité sont moins grands que ceux encourus dans le cadre d'une transmission des savoirs assurée par la forme « traité ».

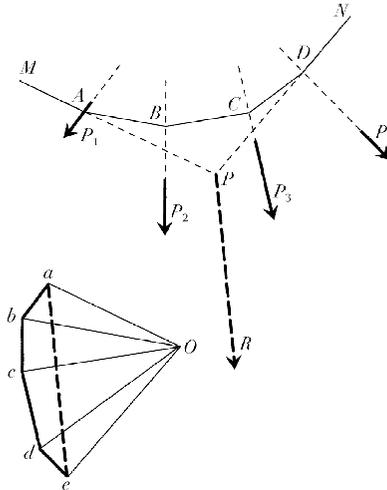
²⁶ Signalons ici que les exemples de Navier et de Saint-Venant ne sont pas des phénomènes isolés. D'autres grands mécaniciens de la première moitié du XIX^e siècle font également montre d'une culture historique étonnamment riche. Sur le cas de Poncelet, voir [Chatzis 1998].

ANNEXE

**POLYGONE DES FORCES ET POLYGONE FUNICULAIRE,
LES CONCEPTS DE BASE DE LA STATIQUE GRAPHIQUE**

Partie I. — Les concepts de base de la statique graphique sont au nombre de deux : le polygone des forces et le polygone funiculaire. Soit, dans un plan, un système quelconque de forces P_1, P_2, P_3, P_4 , représentées par des vecteurs (on se limite ici à quatre forces mais le raisonnement est valable pour un nombre quelconque de forces). À partir d'un point quelconque situé dans le plan, portons bout à bout des vecteurs équipollents aux vecteurs représentant le système de quatre forces : la construction $abcde$ qui en résulte est le polygone des forces correspondant aux quatre forces de l'exemple et le vecteur ae , fermant le contour ainsi obtenu, est la résultante de ces forces.

Quant au polygone funiculaire correspondant à ce système de forces, il est obtenu de la façon suivante : prenons, dans le plan du polygone $abcde$, un point O appelé le pôle, et joignons ce point aux divers sommets du polygone.



Ensuite par un point M , également quelconque, menons une ligne MA parallèle à Oa , jusqu'à la rencontre en A avec la direction de la force P_1 puis, à partir du point A une ligne AB , parallèle à Ob jusqu'à sa

rencontre en B avec la direction de la force P_2 , et ainsi de suite jusqu'à la dernière ligne DN , qui sera menée au-delà de la direction de la force P_4 , parallèlement au dernier côté Oe . La ligne polygonale $MABCDN$ ainsi construite est le polygone funiculaire des forces données P_1, P_2, P_3, P_4 . Prolongeons-en les deux côtés extrêmes MA, DN , jusqu'à leur intersection en P , le point P est un point de la résultante du système donné des forces, laquelle sera, par conséquent, la force PR menée, par ce point, équipollente au vecteur ae .

Étant donné un système de forces, la construction du polygone funiculaire correspondant (un pour chaque pôle choisi arbitrairement), permet de calculer graphiquement la résultante de ce système (on a vu comment en effet déterminer graphiquement les trois composantes de la résultante : point d'application, direction et grandeur). En suivant cette marche, on peut également calculer graphiquement la résultante d'une partie des forces données.

Partie II. — Le polygone funiculaire ainsi construit est un objet géométrique (ensemble de lignes). Il peut se transformer en objet ayant une signification matérielle de la façon suivante. Si l'on suppose les droites MA, AB, BC, CD, DN , remplacées par des cordons flexibles et inextensibles, les forces P_1, P_2, P_3, P_4 transportées aux points A, B, C, D de leurs directions, et les deux cordons extrêmes MA et DN tirés par des tensions (à savoir des forces qui ont la direction du cordon et sont dirigées de façon à le tendre) égales aux diagonales Oa et Oe du polygone $Oabcde$; on obtient un polygone funiculaire au sens matériel du terme (un ensemble de cordons soumis à des forces extérieures qui créent des forces intérieures, les tensions, à l'intérieur des cordons) qui est en équilibre.

Si notre point de départ est le polygone funiculaire $MABCDN$, au sens matériel du terme, en équilibre sous l'action de forces extérieures (ici les forces P_1, P_2, P_3, P_4), la construction $Oabcde$ nous donne graphiquement les tensions de différents cordons qui composent le polygone funiculaire. Ainsi Oa est équipollent à la tension extrême MA , Ob à la tension du cordon AB, \dots, Oe équipollent à la tension extrême DN . À partir d'un point a , construisons le polygone de forces extérieures P_1, P_2, P_3, P_4 ($abcde$). À partir des sommets de ce polygone, menons des parallèles aux cordons AM, AB, BC, CD, DN , du polygone funiculaire. Si le polygone

funiculaire est en équilibre, ces lignes convergent au pôle O , et les diagonales Oa, Ob, Oc, Od et Oe sont équipollentes aux tensions du polygone.

BIBLIOGRAPHIE

ARNAL (Louis-Marius)

[1898] *Traité de mécanique*, t. 3 : *Statique graphique et résistance des matériaux*, Paris : Fanchon & Artus, 1898.

BECCHI (Antonio), CORRADI (Massimo), FOCE (Federico), PEDEMONTE (Orietta), éd.

[2002] *Towards a History of Construction*, Basel : Birkhäuser, 2002.

BÉLANGER (Jean-Baptiste)

[1842–1843] *Notes sur la mécanique appliquée aux principes de la stabilité des constructions et à la théorie dynamique des machines*, Paris, 1842–1843 (lithographié).

BELHOSTE (Bruno), DAHAN-DALMEDICO (Amy), PICON (Antoine), éd.

[1994] *La formation polytechnicienne, 1794–1994*, Paris : Dunod, 1994.

BELHOSTE (Bruno), DAHAN-DALMEDICO (Amy), PESTRE (Dominique),

PICON (Antoine), éd.

[1995] *La France des X, deux siècles d'histoire*, Paris : Economica, 1995.

BELHOSTE (Bruno), PICON (Antoine), éd.

[1996] *L'École d'application de l'artillerie et du génie de Metz (1802–1870). Enseignement et recherches*, Paris : Musée des Plans-Reliefs, 1996.

BELHOSTE (Bruno), CHATZIS (Konstantinos)

[1998] L'enseignement de la mécanique appliquée en France au début du XX^e siècle, dans [Fontanon 1998], p. 29–46.

BELHOSTE (Bruno)

[2003] *La formation d'une technocratie : l'École polytechnique et ses élèves de la Révolution au Second Empire*, Paris : Belin, 2003.

BELIDOR (Bernard Forest de)

[1819] *Architecture hydraulique, ou l'Art de conduire, d'élever, et de ménager les eaux pour les différents besoins de la vie, nouvelle édition avec des notes et additions par M. Navier*, 1^e partie, t. 1, Paris : Didot, 1819 (1^e éd., Paris : Jombert, 1737–1739).

BENSAUDE-VINCENT (Bernadette), GARCIA BELMAR (Antonio),

BERTOMEU SANCHEZ (José Ramon)

[2003] *L'émergence d'une science des manuels. Les livres de chimie en France (1789–1852)*, Paris : Éditions des Archives contemporaines, 2003.

BENVENUTO (Edoardo)

[1991] *An Introduction to the History of Structural Mechanics. Part II : Vaulted Structures and Elastic Systems*, New York : Springer, 1991.

BOSSUT (Charles), Abbé

[1772] *Traité élémentaire de mécanique statique*, Paris : Jombert, 1772.

BOURLET (Charles-Émile-Ernest, dit Carlo)

[1902] *Cours de statique graphique comprenant les éléments de la statique graphique et du calcul des moments d'inertie à l'usage des élèves architectes et ingénieurs*, Paris : Gauthier-Villars, 1902.

BRESSE (Jacques-Antoine-Charles)

- [1854] *Recherches analytiques sur la flexion et la résistance des pièces courbes*, Paris : Mallet-Bachelier, 1854.
- [1865] *Cours de mécanique appliquée, t. III : Calcul des moments de flexion dans une poutre à plusieurs travées solidaires*, Paris : Gauthier-Villars, 1865.
- [1877] Note sur la détermination graphique des moments fléchissants qui se produisent, dans une poutre à deux appuis simples, pendant le passage d'un convoi de poids isolés circulant très lentement, *Annales des ponts et chaussées*, 1877, 2^e semestre, p. 320–328.
- [1880] *Cours de mécanique appliquée, 1^e partie : Résistance des matériaux et stabilité des constructions*, 3^e éd., Paris : Gauthier-Villars, 1880.

CAMUS (Charles-Étienne-Louis)

- [1752] *Cours de mathématique, 3^e partie : Éléments de mécanique statique*, t. 2, Paris : Imprimerie royale, 1752.
- [1767] *Cours de mathématique, 3^e partie : Éléments de mécanique statique*, t. 2, 3^e éd., Paris : Imprimerie de Prault, 1767.

CARMONA (Michel)

- [2002] *Eiffel*, Paris : Fayard, 2002.

CHARLTON (Thomas Malcolm)

- [1982] *A History of Theory of Structures in the Nineteenth Century*, Cambridge : Cambridge University Press, 1982.

CHASLES (Michel)

- [1877] Compte rendu de l'ouvrage de A. Favaro : *Lezioni di Statica grafica* (Padova, 1877), *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences*, 84 (1877), p. 726.

CHATZIS (Konstantinos)

- [1994] Mécanique rationnelle et mécanique des machines, dans [Belhoste *et al.* 1994], p. 95–108.
- [1996] Jean-Victor Poncelet et la science des machines à l'École de Metz : 1825–1870, dans [Belhoste *et al.* 1996], p. 32–42.
- [1998] Jean-Victor Poncelet (1788–1867) ou le Newton de la mécanique appliquée. Quelques réflexions à l'occasion de son cours inédit à la Sorbonne, *Sabix*, 19 (1998), p. 69–97.
- [2002] Mécanique physique, expérimentation et tradition dans la science des constructions de J.-V. Poncelet (1788–1867), dans [Becchi *et al.* 2002], p. 343–354.

CHEMLA (Karine)

- [1995] Histoire des sciences et matérialité des textes, *Enquête*, 1 (1995), p. 167–180.

CLAPEYRON (Benoît-Paul-Émile)

- [1857] Calcul d'une poutre élastique reposant librement sur des appuis inégalement espacés, *C. R. Acad. sci. Paris*, 45 (1857), p. 1076–80.

COLLIGNON (Édouard)

- [1865] *Théorie élémentaire des poutres droites. Ponts métalliques, ponts américains, combles*, Paris : Dunod, 1865.
- [1868] La statique graphique par M. K. Culmann, professeur à l'École polytechnique de Zurich, *Annales des ponts et chaussées*, 1868, 1^{er} semestre, p. 224–225.
- [1875] Sur un nouvel ouvrage de M. J. Weyrauch, *Annales des ponts et chaussées*, 1875, 2^e semestre, p. 713–714.

- [1877a] Note sur les Leçons de statique graphique de M. Antonio Favaro, professeur à l'université de Padoue, *Annales des ponts et chaussées*, 1877, 1^{er} semestre, p. 557–570.
- [1877b] *Cours de mécanique appliquée aux constructions. 1^e partie : Résistance des matériaux*, 2^e éd., Paris : Dunod, 1877; 3^e éd., 1885 (1^e éd., 1869).
- [1881] *Traité de mécanique. 2^e partie : Statique*, 2^e éd., Paris : Hachette, 1881 (1^e éd., 1873).
- [1885] Note sur la détermination graphique des moments fléchissants dans les pièces chargées de poids discontinus, *Annales des ponts et chaussées*, 1885, 2^e semestre, p. 5–46.
- COTTE (Michel)
- [1992] Innovation et pont suspendu dans la France de 1825, *Culture technique*, 26 (1992), p. 204–212.
- CREMONA (Luigi)
- [1885] *Les figures réciproques en statique graphique*, trad. de l'italien par Louis Bossut, ouvrage précédé d'une introduction de Giuseppe Jung et suivi d'un appendice de Carlo Saviotti, Paris : Gauthier-Villars, 1885.
- CROSLAND (Maurice Pierre), SMITH (Crosbie)
- [1979] The Transmission of Physics from France to Britain : 1800–1840, *Historical Studies in Physical Science*, 9 (1979), p. 1-61.
- CULMANN (Carl)
- [1866] *Die graphische Statik*, Zürich : Meyer & Zeller, 1866; 2^e éd. refondue, vol. 1, 1875.
- [1880] *Traité de statique graphique*, trad. de la 2^e éd. allemande par G. Glasser, J. Jacquier & A. Valat, Paris : Dunod, 1880.
- DHOMBRES (Jean)
- [1985] French mathematical textbooks from Bézout to Cauchy, *Historia Scientiarum*, 28 (1985), p. 91–137.
- DIGEON (Claude)
- [1959] *La crise allemande de la pensée française, 1870–1914*, Paris : PUF, 1959.
- DUPIN (Charles)
- [1826] *Géométrie et mécanique des arts et métiers et des beaux arts, cours normal à l'usage des artistes et des ouvriers, des sous-chefs et des chefs d'ateliers et de manufactures, professé au Conservatoire royal des arts et métiers, t. II : Mécanique*, Paris : Bachelier, 1826.
- EDDY (Henry Turner)
- [1877] *New Constructions in Graphical Statics*, New York : Van Nostrand, 1877. Trad. allemande : *Neue Constructionen aus der graphischen Statik*, Leipzig : Teubner, 1880.
- FAVARO (Antonio)
- [1879] *Leçons de statique graphique. Première partie. Géométrie de position*, trad. de l'italien par Paul Terrier, Paris : Gauthier-Villars, 1879.
- [1885] *Leçons de statique graphique. Deuxième partie. Calcul graphique*, trad. de l'italien par Paul Terrier, avec appendice et notes du traducteur, Paris : Gauthier-Villars, 1885.
- FLAMANT (Alfred)
- [1886] Note sur la *Statique graphique* de M. Maurice Lévy, *Annales des ponts et chaussées*, 1886, 1^{er} semestre, p. 637–644.
- [1888] Note complémentaire sur la *Statique graphique* de M. Maurice Lévy, *Annales des ponts et chaussées*, 1888, 1^{er} semestre, p. 458–463.

- [1909] *Stabilité des constructions. Résistance des matériaux*, 3^e éd., Paris & Liège : Baudry, 1909 (1^e éd. 1886).
- FONTANON (Claudine), éd.
 [1998] Histoire de la mécanique appliquée. Enseignement, recherche et pratiques mécaniciennes en France après 1880, *Cahiers d'histoire et de philosophie des sciences*, 46 (1998).
- FONTVIOLANT (Bertrand de)
 [1884] *Calcul des poutres continues. Méthode générale analytique et méthode graphique*, Paris : Broise & Courtier, 1884 (autographié); réimp. avec discussion dans *Mémoires et compte rendu des travaux de la Société des ingénieurs civils*, 1 (1885), p. 288–296; 2 (1885), p. 255–348.
 [s.d.] *Notice sur les travaux scientifiques et industriels de Bertrand de Fontviolant* (sans date, plusieurs exemplaires à la bibliothèque de l'École centrale des arts et manufactures).
- FOURET (Georges-François)
 [1876] Détermination graphique des moments de flexion d'une poutre à plusieurs travées solidaires, *Annales des ponts et chaussées*, 1876, 1^{er} semestre, p. 473–495.
- FRANCOEUR (Louis-Benjamin)
 [1825] *Traité de mécanique élémentaire*, 5^e éd., Paris : Bachelier, 1825 (1^e éd., Paris : Perronneau, an IX).
- GERHARDT (Rolf)
 [2002] Reflections on the application of graphical methods to statical problems, dans [Becchi et al. 2002], p. 377–384.
- GISPERT (Hélène)
 [1991] La France mathématique. La Société mathématique de France (1870–1914), *Cahiers d'histoire et de philosophie des sciences*, 34 (1991).
- GOUARD (Émile), HIERNAUX (Georges)
 [1910] *Cours élémentaire de mécanique industrielle*, 3 vol., Paris : Dunod & Pinat, 1910.
- GRAHAM (Robert Hudson)
 [1883] *Graphic and Analytic Statics in Theory and Comparison*, Londres : Lockwood, 1883.
- GRATTAN-GUINNESS (Ivor), éd.
 [1994] *Companion Encyclopedia of the History and Philosophy of the Mathematical Sciences*, vol. 2, Londres & New York : Routledge, 1994.
- GOUZÉVITCH (Irina), BRET (Patrice), éd.
 [1997] *Naissance d'une communauté internationale d'ingénieurs (première moitié du XIX^e siècle), actes des journées d'étude, 15–16 décembre 1994*, Paris : Cité des sciences et de l'industrie, 1997.
- GUILLAUME (Victor)
 [1885] Notice sur la statique graphique, *Annales des ponts et chaussées*, 1885, 2^e semestre, p. 267–351.
- GUILLET (Léon)
 [1929] *Cent ans de la vie de l'École centrale des arts et manufactures, 1829–1929*, Paris : De Brunoff, 1929.
- HAUSSER (Auguste-Édouard), CUNQ (L.)
 [1885] Note sur les moments fléchissants sur les appuis d'une poutre droite continue produits par la surcharge formée de charges isolées ou non, *Annales des ponts et chaussées*, 1885, 2^{er} semestre, p. 613–644.

- [1886] *Statique graphique appliquée. Traité élémentaire de résistance des matériaux*, Paris : Dunod, 1886.
- HELE SHAW (Henry Selby)
- [1890] First report of the Committee, consisting of Mr. W.H. Preece (Chairman), Professor H.S. Hele Shaw (Secretary), Messrs. B. Baker, W. Anderson, and G. Kapp, and Professors J. Perry and R.H. Smith, appointed to report on the development of graphic methods in mechanical science, dans *Report of the Fifty-Ninth Meeting of the British Association for the Advancement of Science (BAAS) held at Newcastle-upon-Tyne in September 1889*, London : John Murray, 1890, p. 322–327.
- HENNEBERG (Lebrecht)
- [1909] Die graphische Statik der starren Körper, dans *Encyclopädie der mathematischen Wissenschaften mit Einschluss ihrer Anwendungen*, t. IV, vol. 1, Leipzig : Teubner, 1909, p. 345–434.
- HERMANN (Gustave)
- [1882] *Statique graphique des mécanismes pour la détermination du rendement des machines et des efforts subis par leurs organes*, trad. de l'allemand par W. Schitz et P. Castin, Paris : Bernard, 1882 (éd. orig., 1879).
- JAUSS (Hans Robert)
- [1978] *Pour une esthétique de la réception*, trad. de l'allemand par Claude Mailard, Paris : Gallimard, 1978 (éd. orig., 1972–75).
- JULLIEN (Pierre)
- [1837] Note sur quelques propriétés du polygone qu'affecte la chaîne d'un pont suspendu, *Annales des ponts et chaussées*, 1837, 1^{er} semestre, p. 133–167.
- KAHLOW (Andreas)
- [1997] Poncelet et 'esprit de la géométrie', dans [Gouzévitch *et al.* 1997], p. 32–41.
- KÄCHLIN (Maurice)
- [1889] *Applications de la statique graphique*, Paris & Liège : Baudry, 1889; 2^e éd., 1898.
- LA HIRE (Philippe de)
- [1695] *Traité de mécanique, où l'on explique tout ce qui est nécessaire dans la pratique des arts*, Paris : Anisson, 1695; réimp. dans *Œuvres diverses de M. de la Hire*, Paris : Compagnie des libraires, 1730.
- LAMÉ (Gabriel), CLAPEYRON (Benoît-Paul-Émile)
- [1828] Mémoire sur la construction des polygones funiculaires, *Journal du génie civil*, 1 (1828), p. 496–504.
- LAURENT (P.)
- [1882–1883] Quelques considérations déduites des premiers principes de la statique graphique, *Le génie civil* (1882–1883), p. 4–9, 33–36, 80–83, 104–106, 152–155, 177–180, 222–224.
- [1884–1885] Détermination graphique des moments de flexion sur les points d'appui d'une poutre droite, *Le génie civil* (1884–1885), p. 328–331.
- LEMOINE (Bertrand)
- [1984] *Gustave Eiffel*, Paris : Hazan, 1984.
- LEMOYNE (Nicolas-René-Désiré)
- [1825] *Moyens faciles de parvenir à fixer les conditions de l'établissement des ponts suspendus*, Paris : Carilian-Gœury, 1825.
- LÉVY (Maurice)
- [1874] *La statique graphique et ses applications aux constructions*, Paris : Gauthier-Villars, 1874.

- [1886–1888] *La statique graphique et ses applications aux constructions*, 2^e éd., 4 vol. et 2 atlas, Paris : Gauthier-Villars, 1886–1888.
- [1907–1926] *La statique graphique et ses applications aux constructions*, 3^e éd., 4 vol. et 4 atlas, Paris : Gauthier-Villars, 1907–1926.
- MAURER (Bertram)
 [1998] *Karl Culmann und die graphische Statik*, Berlin : Verlag für Geschichte der Naturwissenschaft und der Technik, 1998.
- MAURER (Maurice)
 [1882] *Statique graphique appliquée aux constructions*, Paris & Liège : Baudry, 1882 ; 2^e éd., 1886.
- MICHAL (Zoroastre Alexis)
 [1839] Notes sur quelques propriétés des polygones funiculaires, en équilibre sous l'action de poids uniformément repartis sur une ligne horizontale. Application à la construction et au calcul des éléments du polygone qu'affecte la chaîne d'un pont suspendu, *Annales des ponts et chaussées*, 1839, 1^{er} semestre, p. 38–54.
- MICHON (Pierre-Félix)
 [1848] *Instruction sur la résistance des matériaux, suivie d'applications aux pièces droites et aux fermes de charpente des bâtiments*, Metz, 1848 (lithographié).
- MONGE (Gaspard)
 [1810] *Traité élémentaire de statique, à l'usage des écoles de la marine*, 5^e éd., Paris : Courcier, 1810 (1^e éd., 1786).
- MÜLLER-BRESLAU (Heinrich)
 [1886] *Éléments de statique graphique appliquée aux constructions, 1^e partie : Poutres droites, poussée des terres, voûtes, trad. de l'allemand, avec une 2^e partie : Poutres continues. Applications numériques*, par Théophile Seyrig, Paris & Liège : Baudry, 1886.
- NAVIER (Claude-Louis-Marie-Henri)
 [1823] *Rapport à Monsieur Becquey, conseiller d'État, directeur général des ponts et chaussées et des mines, et Mémoire sur les ponts suspendus*, Paris : Imprimerie Royale, 1823.
 [1833–1834] *Résumés des leçons de mécanique données à l'École polytechnique*, Paris, 1834 (autographié).
 [1864] *Résumé des leçons données à l'École des ponts et chaussées sur l'application de la mécanique à l'établissement des constructions et des machines. 1^e partie contenant les leçons sur la résistance des matériaux et sur l'établissement des constructions en terre, en maçonnerie et en charpente, 1^e Section. De la résistance des corps solides*, 3^e éd. avec des notes et des appendices par M. Barré de Saint-Venant, Paris : Dunod, 1864.
- OCAGNE (Maurice d')
 [1920] *Cours de géométrie à l'École polytechnique*, 2^e division, 1919–1920, vol. 2, Paris, 1920 (lithographié).
- PETIT (Pierre)
 [1885] *Cours de construction (à l'École d'application de Fontainebleau), 3^e partie : Résistance des matériaux. Statique graphique*, Fontainebleau, 1885 (lithographié).
- PICHAULT (S.)
 [1873] Calcul graphique, arithmographe, statographe (procédés pour résoudre avec la règle et le compas les divers problèmes de l'arithmétique, de l'algèbre, de la géométrie, de la trigonométrie, de la mécanique, etc.),

Annales industrielles (1873), p. 208–216, 230–238, 273–277, 295–304, 331–339, 357–363.

PICON (Antoine)

[1992] *L'invention de l'ingénieur moderne. L'École des ponts et chaussées, 1747–1851*, Paris : Presses de l'École des ponts et chaussées, 1992.

PLANAT (Paul)

[1887] *Pratique de la mécanique appliquée à la résistance des matériaux*, Paris : Bibliothèque de la Construction moderne, 1887.

POISSON (Siméon-Denis)

[1811] *Traité de mécanique*, 2 vol., Paris : Courcier, 1811.

PONCELET (Jean-Victor)

[1827–1830] *Cours de mécanique industrielle, rédigé par Mr le capitaine du Génie Gosselin*, Paris : Lithographie de Clouet, 1^{re} partie, 1827–1828; 2^e partie, 1828–1829; 3^e partie, 1830.

[1839] *Cours de mécanique industrielle, exposant les principes de statique et dynamique, les organes mécaniques et les moteurs*, Liège, 1839.

[1840–1841] *Cours de mécanique physique et expérimentale, rédigé par l'officier de l'artillerie A. Morin, 1841* (manuscrit), Archives de l'École polytechnique (Fonds Poncelet).

PRONY (Gaspard Riche de)

[an VIII] *Mécanique philosophique, ou Analyse raisonnée des diverses parties de la science de l'équilibre et du mouvement*, Paris : De l'imprimerie de la République, an VIII.

RÉSAL (Jean)

[1885] *Ponts métalliques*, t. 1, Paris & Liège : Baudry Cie, 1885.

[1889] *Ponts métalliques*, t. 2, Paris & Liège : Baudry Cie, 1889.

[1898] *Résistance des matériaux*, Paris & Liège : Baudry Cie, 1898.

[1901] *Stabilité des constructions*, Paris : Béranger, 1901.

REULEAUX (Franz)

[1873] *Le constructeur*, trad. de la 3^e éd. allemande par A. Debise, Paris : Savy, 1873.

RIBEILL (George)

[1996] Les armes du succès, *Les Cahiers de Science & Vie, hors série : Gustave Eiffel*, 35 (1996), p. 32–40.

RITTER (Wilhelm)

[1886] *La ligne élastique et son application à la poutre continue traitée par la statique graphique*, trad. de la 2^e éd. allemande par Maurice Koechlin, Paris & Liège : Baudry Cie, 1886.

ROUCHÉ (Eugène), COMBEROUSSE (Charles de)

[1883] *Traité de géométrie élémentaire*, 5^e éd., Paris : Gauthier-Villars, 1883 (1^{re} éd., 1866).

[1888] *Éléments de géométrie*, 4^e éd., Paris : Gauthier-Villars, 1888 (1^{re} éd., 1867).

ROUCHÉ (Eugène)

[1889] *Éléments de statique graphique*, Paris & Liège : Baudry Cie, 1889.

SALMON (Ernest Hinkley)

[1938] *Materials and Structures, vol. II : The Theory and Design of Structures*, London : Longmans, Green & Co., 1938.

SCHOLZ (Erhard)

[1994] Graphical statics, dans [Grattan-Guinness 1994], p. 987–993.

- SEGUIN (Marc, dit Seguin aîné)
 [1826] *Des ponts en fil de fer*, 2^e éd., Paris : Bachelier, 1826 (1^e éd., 1824).
- SEYRIG (Théophile)
 [1898] *Statique graphique des systèmes triangulés, t. 1 : Exposés théoriques, t. 2 : Exemples d'application*, Paris : Gauthier-Villars & Masson, 1898; 2^e éd., 1901-1908.
- THIRÉ (Arthur)
 [1888] *Éléments de statique graphique appliquée à l'équilibre des systèmes articulés*, Paris & Liège : Baudry Cie, 1888.
- TIMOSHENKO (Stephen Prokofievitch)
 [1953] *History of Strength of Materials*, New York : McGraw-Hill, 1953.
- TODHUNTER (Isaac), PEARSON (Karl)
 [1893] *A History of the Theory of Elasticity and of the Strength of Materials, vol. II : Saint-Venant to Lord Kelvin, partie I*, Cambridge : Cambridge University Press, 1893.
- TOURNÈS (Dominique)
 [2000] Pour une histoire du calcul graphique, *Revue d'histoire des mathématiques*, 6 (2000), p. 127–161.
- VARIGNON (Pierre)
 [1725] *Nouvelle mécanique, ou Statique, dont le projet fut donné en 1687*, t. I, Paris : Jombert, 1725.
- WARWICK (Andrew)
 [1992–1993] Cambridge mathematics and Cavendish physics : Cunningham, Campbell and Einstein's relativity 1905–1911. I : The uses of theory. II : Comparing traditions in Cambridge physics, *Studies in History and Philosophy of Science*, 23 (1992), p. 625–656; 24 (1993), p. 1–25.
- WEISS (John Hubbel)
 [1995] Les ingénieurs des ponts et chaussées et leurs subordonnés au XIX^e siècle, dans [Belhoste et al. 1995], p. 75–86.
- WILLIOT (Victor-Joseph)
 [1878] *Notions pratiques sur la statique graphique*, Paris : Lacroix, 1878 (Extrait des *Annales du génie civil*, 2^e série, 6^e année, n^o 10 et n^o 12, oct. et déc. 1877).
- WINKLER (Emil)
 [1877] *Théorie des ponts. Les poutres droites considérées au point de vue des forces extérieures*, trad. de l'allemand par Ch. d'Espine, Paris : Lacroix, 1877 (éd. orig., 1872).
- ZELDIN (Théodore)
 [1994] *Histoire des passions françaises (1848–1945)*, trad. de l'anglais par Paule Bolo et al., 2 vol., Paris : Payot, 1994 (éd. orig., 1973–1977).
 [2002] Les Français selon Zeldin (entretien avec l'auteur), *Le Monde* (coll. Dossiers et Documents), n^o 315, décembre 2002, p. 8.