



HAL
open science

Historiographie du calcul graphique

Marie-José Durand-Richard

► **To cite this version:**

| Marie-José Durand-Richard. Historiographie du calcul graphique. 2016. halshs-01516382

HAL Id: halshs-01516382

<https://shs.hal.science/halshs-01516382>

Preprint submitted on 30 Apr 2017

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

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

Chapitre 8

Historiographie du calcul graphique

Marie-José DURAND-RICHARD

Comme en témoigne l'abondante documentation réunie dans les chapitres précédents, le calcul graphique et graphomécanique s'est développé au cours du XIX^e siècle pour constituer une discipline à part entière jusqu'aux années 1970, aussi bien en Europe qu'aux États-Unis ou en Russie. Ses méthodes ont alors été éclipsées par celles des équipements informatiques, même si son usage perdure encore localement dans des situations spécifiques, justifiant la persistance d'une fabrication de graphes et d'instruments. Pourtant, aussi bien l'histoire des mathématiques que les premières histoires de l'informatique privilégient l'histoire du calcul numérique digital, occultant de fait l'importance du calcul graphique et allant même parfois jusqu'à ignorer son existence¹. L'abondante bibliographie qui s'y réfère témoigne pourtant de l'impact majeur de cet autre mode de calcul au cours des deux derniers siècles, sans oublier l'implication préalable des méthodes géométriques dans la fabrication d'instruments mathématiquement sophistiqués (cf. chap. 1 et 2). L'étude historiographique menée ici tend à préciser les conditions dans lesquelles cette discipline a pris corps, afin de mieux comprendre les raisons de son effacement. En d'autres termes, l'objectif principal de ce dernier chapitre est de cerner les enjeux qui ont conduit à délimiter les frontières conceptuelles et institutionnelles du calcul graphique, frontières dont le déplacement a pu induire sa désintégration. Les textes fondateurs des années 1880 manifestent en effet un souci de théorisation et de légitimation qui traduit l'unification progressive de pratiques d'abord développées en réponse à des besoins précis et jusque là maintenues dans un certain cloisonnement

1. Dans son histoire de *L'informatique en France de la Seconde Guerre mondiale au Plan Calcul* [119], Pierre-Éric Mounier-Kuhn fait partie des auteurs qui échappent à l'écueil de l'approche rétrohistorique par une étude minutieuse des antécédents conceptuels, techniques et institutionnels de l'ordinateur. Il retrace en particulier les conditions d'élaboration des machines, analogiques ou digitales, qui ont été étudiées (machines de Fréchet, de Couffignal) ou réalisées (cuves rhéologiques, cuves rhéoélectriques Pérès-Malavard, intégrateur de Maréchal, calculateurs analogiques) en France depuis les années 1920.

en raison de leur spécificité. Cette unification ira de pair avec les transformations qui accompagnent l'industrialisation des sociétés, essentiellement en Europe et outre-Atlantique. Dans ce processus, le monde des ingénieurs affirme une identité nouvelle, marquée par ses implications dans le développement économique des états industriels et par la structuration de relations professionnelles compétitives qui dépassent les frontières nationales.

De par leur importance dans le travail de rationalisation des modes de calcul, les mathématiques se trouvent directement investies dans l'explicitation des critères de légitimation propres à cette culture d'ingénieur en voie de constitution. Les publications relevant du calcul graphique et graphomécanique s'inscrivent dans cette perspective : leurs caractéristiques locales vont se trouver affectées par les différentes formes d'institutionnalisation de la profession, notamment par leurs relations avec les milieux académiques. Ce faisant, la légitimation du calcul graphique va entrer en résonance avec les débats qui agitent alors les mathématiciens dans la seconde moitié du XIX^e siècle quant aux véritables fondements – algébriques ou géométriques – de leur propre discipline. Calcul numérique et calcul graphique soutiennent de fait des méthodologies distinctes, respectivement portées par le développement de l'analyse mathématique et celui des nouvelles géométries. Afin d'analyser la complexité des modalités par lesquelles le calcul graphique et graphomécanique se constitue en discipline autonome, ainsi que l'effacement dont il est aujourd'hui l'objet, cette étude historiographique rappellera d'abord les étapes majeures de cette constitution, avant d'examiner les besoins spécifiques auxquels elle répond et les conditions institutionnelles – voire politico-économiques – dans lesquelles ont travaillé ses acteurs. Le statut attribué à ce mode de calcul dans les publications concernées sera confronté à la conception des mathématiques que valorisent leurs auteurs, éclairant ainsi la façon dont est envisagée l'histoire de la discipline et le rôle qu'elle est censée jouer dans ce type de publication. Dès la fin du XIX^e siècle, si les méthodes graphiques perdurent, le recours à la mécanisation des calculs se généralise, aussi bien du fait d'interactions spécifiques entre science et industrie, qu'en raison de l'augmentation croissante des besoins. De l'analyseur harmonique à l'analyseur différentiel, les machines analogiques permettent d'assurer la résolution approchée des équations différentielles intervenant massivement dans les processus de maîtrise du monde physique qui se déploient tous azimuts. Ces machines rencontreront au milieu du XX^e siècle les machines arithmétiques, que l'introduction des cartes perforées transforment en machines à stocker des données en grand nombre, aussi bien pour les statistiques que pour le calcul astronomique. Stockage des données et organisation logique des machines constituent les deux problèmes majeurs dont la résolution conjointe débouchera sur la conception des ordinateurs au sortir de la Seconde Guerre mondiale.

8.1. Des procédés de calcul à la constitution d'une discipline

Tel qu'il a été présenté dans les pages précédentes, le calcul graphique regroupe tous les procédés exploitant des tracés réalisés sur un support essentiellement plan, à l'aide de n'importe quel type d'appareil, et qui visent à éviter, en totalité ou en partie, le recours au calcul numérique pour la résolution d'un problème. Tout l'intérêt de ce mode de calcul réside dans le fait qu'il fournit graphiquement la solution du problème considéré, y compris quand interviennent d'autres opérations que les opérations arithmétiques élémentaires, en particulier l'intégration. Cette définition du calcul graphique permet d'insister sur quatre spécificités constitutives de la discipline : le rôle effectif de la finalité des calculs qui motivent cette activité, la référence fondamentale à un traitement en continu du champ numérique, ainsi qu'à l'adéquation entre l'approximation fournie et les fins du calcul, et la division du travail que suppose l'idée de réaliser les calculs préalablement à leur utilisation en situation. Les différentes méthodes envisagées, qu'il s'agisse de constructions géométriques ou de tables numériques ou graphiques, qu'elles soient manuelles ou instrumentales, dispensent en effet l'utilisateur d'effectuer par lui-même certains calculs ; elles lui fournissent le résultat moyennant une simple lecture sur un cadran, sur une courbe, ou sur une épure munie d'un quadrillage qui aide à trouver visuellement une interpolation. C'est d'ailleurs cette possibilité d'une interpolation « à vue » qui marque toute la puissance de ces méthodes, dont la multiplicité au XIX^e siècle témoigne de l'éventail des pratiques calculatoires.

Lorsqu'en 1839, dans son ouvrage *Le calcul par le trait, ses éléments et ses applications* [25], l'ingénieur des Ponts et Chaussées Barthélémy-Édouard Cousinery (1790-1851) baptise ainsi les différentes pratiques de calcul linéaire de ses condisciples, il signe en quelque sorte l'acte de naissance du calcul graphique (cf. § 4.1.2). Les nombres cherchés y sont représentés essentiellement par des segments de droites, parfois aussi par d'autres éléments géométriques, comme des angles ou des aires, en tous cas par des grandeurs considérées comme continues. Les opérations pratiquées sur ces grandeurs mettent en œuvre des propriétés mathématiques ou mécaniques par le biais de constructions géométriques ou d'instruments, et la lecture directe donne une approximation du résultat obtenu, qui suffit aux besoins pour lesquels ce mode de calcul a été conçu.

C'est cependant avec l'adjonction de la nomographie au calcul par le trait que se constitue le calcul graphique tel qu'il est défini aujourd'hui (cf. § 4.2). Dans une situation donnée où les paramètres varient, la nomographie rend obsolète la répétition de certaines constructions. Une approximation adéquate du résultat s'obtient alors par lecture directe sur des « abaques » ou tables graphiques que le mathématicien et ingénieur des Ponts et Chaussées

Maurice d'Ocagne (1862-1938) appellera plus tard des « nomogrammes » ([41], [42]). Ces systèmes de lignes et de points sont cotés selon des échelles données, qui peuvent être régulières ou non lorsqu'elles sont régies par une fonction des paramètres. Auparavant, l'ingénieur des Ponts et Chaussées Léon-Louis Lalanne² (1811-1892) avait déjà introduit en 1843 ce qu'il nommait alors la « géométrie anamorphique », en référence à la déformation – de même nom – des figures. En remplaçant les variables initiales par des fonctions de celles-ci – par exemple, dans le cas de trois variables : x , y , z par $\log x$, $\log y$ et $\log z$ – Lalanne transforme des faisceaux de courbes en faisceaux de droites.

Parallèlement à ces méthodes, le traitement graphique du polygone funiculaire, conçu pour traiter de la composition des forces dans les problèmes d'équilibre des ponts et des voûtes, conduit au développement de la statique graphique (cf. chap. 5). Des travaux de l'ingénieur Carl Culmann (1821-1881) à Karlsruhe et Zürich aux avancées théoriques de Luigi Cremona (1830-1903) et à l'enseignement d'Antonio Favaro (1847-1922) en Italie, la statique graphique se complexifie au contact de la géométrie projective, au moment où l'ingénieur belge Junius Massau (1852-1909) développe de son côté ses méthodes et son enseignement de l'intégration graphique [177]. Au début du xx^e siècle, dans des ouvrages de référence, plusieurs auteurs proposeront une synthèse de ces méthodes, voire de nouvelles avancées produites dans la lignée des efforts de théorisation géométrique. Le principe de dualité de la géométrie projective permet ainsi à d'Ocagne de transformer les abaques à droites concourantes en nomogrammes à points alignés (cf. § 4.2.2).

Quant au calcul graphomécanique, il substitue aux épures discrètes des instruments dont les parties mobiles traduisent mécaniquement les propriétés mathématiques mises en œuvre. Planimètres, intégromètres et intégraphes évitent désormais le problème de l'interpolation en matérialisant par le mouvement le caractère continu de la variation des grandeurs (cf. chap. 6). Si les premiers planimètres sont conçus au début du xix^e siècle, leur succès provient surtout de la simplicité pratique du planimètre polaire de Jakob Amsler (1823-1912) et du développement des instruments scientifiques de précision dans la seconde moitié du siècle, fabriqués essentiellement dans les ateliers d'Amsler à Schaffhausen, d'Albert Ott (1847-1895) à Kempten et de Gottlieb Coradi (1847-1929) à Zürich.

La mécanisation de certaines méthodes de résolution des équations, qu'elles soient algébriques ou différentielles, marque la rencontre entre

2. Lalanne deviendra inspecteur général des Ponts et Chaussées, et directeur de l'École des ponts et chaussées. C'est dans un appendice à l'édition française du *Cours complet de météorologie* de Kämtz [76] que Lalanne donna, pour la première fois, un exposé général de la représentation graphique des tableaux numériques, avec application spéciale aux lois de la météorologie.

le calcul graphomécanique et le développement de la mécanisation en général au XIX^e siècle (cf. § 7.3 et § 7.4). En 1901, dans un mémoire [174] lu à l'Académie des sciences et publié dans les *Mémoires présentés par divers savants*, l'ingénieur espagnol Leonardo Torres Quevedo³ (1852-1936) explicite les « rapports entre le calcul graphique et le calcul mécanique ». En Italie, l'école d'intégration graphomécanique que fonde Ernesto Pascal (1865-1940) à Naples vers la fin du XIX^e siècle s'inscrit dans le prolongement direct de l'invention des intégraphes (cf. § 6.11) de l'ingénieur polonais Bruno Abdank-Abakanowicz (1852-1900), réalisés comme prototypes en France et en Suisse dans les années 1880. Là où le planimètre mesurait l'aire totale de la surface située à l'intérieur d'une courbe fermée, l'intégraphe trace en continu le graphe de la courbe intégrale de cette courbe donnée, le long de laquelle l'opérateur déplace le pointeur.

Les technologies du XX^e siècle permettant notamment de dépasser certains verrous techniques, le système intégrateur des planimètres et intégraphes⁴ sera incorporé dans des machines plus complexes pour résoudre mécaniquement les équations différentielles et intégrales qui interviennent de plus en plus massivement avec la mathématisation des différents champs d'activité de l'ingénierie. Ainsi, l'analyseur harmonique⁵, conçu dans les années 1870 par le physicien William Thomson (1824-1907) – plus tard Lord Kelvin – et son frère, l'ingénieur James Thomson (1822-1892), aligne plusieurs systèmes intégrateurs « disque-sphère-cylindre ». Initialement conçu par James Thomson pour obtenir l'intégrale du produit de deux fonctions [167], ce système est immédiatement adapté dans l'analyseur harmonique pour donner l'intégrale du produit d'une fonction périodique par une fonction sinus ou cosinus [166]. Cette machine, qui permet d'afficher ainsi les premiers coefficients de la décomposition de cette fonction en série de Fourier, c'est-à-dire de ses premières composantes harmoniques (cf. § 6.12.1 et § 7.4.2), est directement conçue et sera immédiatement utilisée pour la prédiction des marées océanographiques et barométriques ([170], [171]). C'est sur les traces de Kelvin que Vannevar Bush (1890-1974), ingénieur au Massachusetts Institute of Technology, réalisera l'analyseur différentiel cinquante ans plus tard, en 1927, avant d'occuper l'importante fonction de directeur de l'Office of Scientific Research and Development coordonnant les activités de la Défense, de l'Industrie et de l'Université pour l'effort de guerre (1941-1947). L'ingénierie électrique et la mise au point de l'amplificateur de torsion – sorte de cabestan

3. Torres est mieux connu comme l'inventeur du premier automate joueur d'échecs, pour lequel il est régulièrement cité dans les ouvrages d'histoire de l'informatique [141].

4. Une roulette tourne et roule sur un solide lui-même en rotation, qui peut être un cône, un disque ou un cylindre.

5. Son nom découle directement du qualificatif d'« analyse harmonique » que Thomson est le premier à attribuer à l'analyse de Fourier.

reliant deux systèmes intégrateurs – lui permettent alors de généraliser le montage en série de plusieurs systèmes intégrateurs et de résoudre ainsi des équations différentielles d'ordre quelconque – en principe, mais concrètement jusqu'à l'ordre 12 – par la méthode des approximations successives (cf. § 7.5.3). Ce type de montage avait déjà été envisagé par Kelvin en 1876, le résultat donné par un intégrateur étant réintroduit comme entrée dans le suivant ([168], cf. § 7.4.3), et cette possibilité avait régulièrement inspiré les ingénieurs confrontés à des besoins numériques de plus en plus cruciaux, de Torres Quevedo à l'ingénieur naval russe Aleksei Nikolaevich Krylov (1863-1945) (cf. § 7.5.2). C'est sur l'analyseur différentiel de Bush que Claude Shannon (1916-2001) fera ses premières armes, offrant aux ingénieurs le langage de l'algèbre de Boole pour penser l'organisation de l'analyseur différentiel, avant de produire une théorie de l'intégration mécanique et, à la fin de la guerre, la théorie de l'information ([155], [156]).

Jusqu'à la mise en place des méthodes informatiques privilégiant le calcul digital, toutes ces méthodes graphiques, reposant sur une approche analogique du calcul, seront systématiquement enseignées dans les écoles d'ingénieurs. En témoigne notamment le *Cours de calcul graphique* donné par André-Louis Cholesky (1875-1918) en 1909 à l'École spéciale des travaux publics, du bâtiment et de l'industrie de Paris ([178]; [15], chap. 7). Mais en témoigne surtout l'intérêt que leur manifestent des mathématiciens reconnus, comme d'Ocagne, dont le *Traité de nomographie* [132] connaîtra 59 traductions partielles ou complètes en 14 langues, ou Carl Runge (1856-1927) à Göttingen, premier professeur de mathématiques appliquées en Allemagne et fondateur de l'analyse numérique, qui enseignera ces méthodes graphiques [151] jusqu'à l'université Columbia à New York en 1905. Le nombre de publications qui s'y rapportent est tout à fait considérable [176]. Aussi bien les publications françaises ou espagnoles des années 1950 – comme les quatre éditions des *Compléments de mathématiques à l'usage des ingénieurs de l'électrotechnique et des télécommunications* du colonel Angot [6], de 1949 à 1961, ou les ouvrages de Juan Carlos Belgrano, António López Nieto et José María Urcelay sur la nomographie ([10], [96], [179]) – que les manuels russes des années 1970 – tels que les *Éléments de nomographie* de Georges Khovanski [77] publiés à Moscou en 1976 – montrent que cette diffusion des méthodes graphiques ne cessera de s'étendre jusqu'à la commercialisation des ordinateurs. Des recherches théoriques se sont d'ailleurs poursuivies sur le sujet, notamment dans les pays d'Europe de l'Est, en interaction avec les recherches théoriques sous-jacentes au développement des ordinateurs.

Ce repérage des étapes les plus manifestes de la constitution du calcul graphique et graphomécanique montre qu'il intervient massivement pour permettre aux ingénieurs d'éviter les calculs laborieux et répétitifs, de plus

en plus nécessaires et abondants, dans les situations où les résultats sont immédiatement exigibles sur le terrain ou au bureau d'études. La résolution des équations différentielles y joue un rôle central, du fait de l'intervention systématique de ces équations dans les problèmes d'ingénierie et de l'absence de méthode mathématique générale susceptible d'en fournir des solutions analytiques. C'est pourquoi dès le début du XIX^e siècle, les premiers travaux font d'abord l'objet de publications dans des revues spécialisées. Celles qui entreprennent d'affirmer l'existence d'un nouveau champ et d'en établir l'histoire sont plus tardives. Elles coïncident avec le moment où le savoir des ingénieurs s'affirme comme tel à travers l'Europe.

8.2. La naissance du calcul graphique et la restructuration industrielle des espaces

L'identification des méthodes graphiques comme discipline, qui s'établit dans la seconde moitié du XIX^e siècle, accompagne donc de fait la montée en puissance – à la fois numérique et sociologique – du monde des ingénieurs en tant que milieu socio-professionnel spécifique. L'ingénieur change alors de statut : le praticien des arts qu'il était depuis la Renaissance [16], au service des cours princières, devient un professionnel travaillant pour la société civile qui se met en place avec l'avènement de la modernité. Ce changement de statut accompagne de fait les transformations politiques à l'œuvre entre le XVII^e et le XIX^e siècle. Investi dans les grands travaux de construction, l'ingénieur participe directement à la restructuration des espaces physique et politique, au moment où les nations se constituent ou se réorganisent autour des grands projets industriels qu'elles soutiennent ou initient, à la fois en Europe, aux États-Unis et dans les empires coloniaux naissants⁶. Dans ce contexte, l'ingénieur met en œuvre un savoir qui conjugue des besoins pratiques constamment présents et une formation appropriée dont la mathématisation ira croissant. Comme l'écrit Lalanne en 1878 : « c'est à tous ces hommes [...] qu'il faut attribuer les progrès successifs d'une idée [celle du calcul graphique] qui paraît aujourd'hui complètement entrée dans le domaine de la pratique » ([88], 2^e éd., p. 55). N'est-ce pas précisément à trop ignorer ces besoins et ces pratiques, à trop privilégier le cadre académique du développement des disciplines, que l'histoire des mathématiques tend à oublier le calcul graphique ? Appréhender les pratiques de l'ingénieur comme « applications » équivaut en effet à les présupposer indépendantes de l'élaboration du savoir mathématique proprement dit, puisque chronologiquement postérieures et

6. La première révolution industrielle va se diffuser dans tout le monde occidental au cours du XIX^e siècle, selon des temporalités différentes suivant les pays (Grande-Bretagne : 1760-1830 ou 1780-1850 selon les sources, France : 1815-1850, Allemagne : 1835-1870, États-Unis : 1860-1885, Japon : 1870-1900, Russie : 1880-1905).

conceptuellement subordonnées. Dans cette perspective, l'ingénieur n'est pas censé développer une activité mathématique à part entière, susceptible de produire de nouveaux dispositifs permettant de résoudre, tant techniquement que mathématiquement, les problèmes auxquels il est confronté⁷.

Ainsi ancré à l'origine dans des pratiques professionnellement circonscrites, le calcul graphique passe d'abord inaperçu. L'espace géographique et économique qu'il contribue à restructurer reste référé comme « naturel ». De fait, l'unification et la diffusion des méthodes du calcul graphique vont accompagner les échanges scientifiques autour des grands projets qui modèlent alors les nouveaux paysages industriels. C'est d'ailleurs dans les pays où le développement industriel coïncide avec une restructuration politique – Allemagne, Italie, Belgique – que ces méthodes graphiques seront le mieux reconnues. Elles y feront alors l'objet d'un enseignement mis en place sous diverses formes selon les pays et les modes d'institutionnalisation des écoles d'ingénieurs, faisant apparaître des disparités locales tout à fait spécifiques d'un pays à l'autre.

8.2.1. Le contexte initial : des pratiques professionnellement circonscrites

Lorsque Lalanne rappelle en 1878 le contexte dans lequel il a inauguré sa géométrie anamorphique, avec la présentation de son *Abaque ou Compteur universel* en 1843, il ne manque pas d'insister sur l'ignorance dans laquelle était tenue la pratique des tables graphiques au début du XIX^e siècle, tout en se livrant à une sorte d'analyse psychologique de l'innovation :

Une propension naturelle porte presque toujours l'auteur qui se croit en possession d'une idée nouvelle à l'appliquer au plus grand nombre de cas possibles. C'est par suite de cette disposition psychologique qu'en cherchant à convertir en tableau graphique à lignes d'égale cote une table de logarithmes à double entrée, dans le genre de celles de Callet, on ne tarda pas à s'apercevoir que la somme des coordonnées de tous les points d'une droite également inclinée sur les axes étant constante, il suffisait de compter sur ces axes des longueurs proportionnelles, non plus aux valeurs numériques des coordonnées, mais à leurs logarithmes, pour que le lieu géométrique de tous les points du plan, dont le produit des distances aux axes est constant, devint une ligne droite. Avec des axes de coordonnées gradués en parties égales, on avait la suite des hyperboles équilatères dans laquelle la puissance varie comme les nombres naturels ; c'était le tableau de Pouchet. En remplaçant les divisions égales par une graduation logarithmique, les lignes d'égal produit cotées 1, 2, 3, 4, etc. deviennent des lignes droites inclinées à 45° sur les axes. Les hyperboles ont donc été transformées en d'autres lignes grâce à l'emploi de *coordonnées graduées* suivant une loi déterminée ; et ce genre de transformation peut être qualifié d'*anamorphose géométrique* ([88], 2^e éd., p. 12-13).

7. C'est ainsi que l'historiographie de l'informatique tend à survaloriser l'apport de la logique mathématique vis-à-vis du travail aussi bien théorique que pratique d'élaboration des machines complexes (voir par exemple [187]).

Dès le début du siècle, ces tables commencent à être utilisées pour représenter non seulement des lois mathématiques connues par des formules, mais des lois empiriques basées sur des séries d'observations supposant un tracé continu. Elles supplantent alors les tables numériques dès que se pose dans un problème la question de l'interpolation [26]. Ces utilisations initiales ne cessent de s'étendre et de se diversifier au cours du XIX^e siècle : en métrologie [146], en météorologie ([50], [76]), dans l'artillerie pour les problèmes de balistique ([125], [162]), dans la marine pour évaluer les poids et volumes transportés [4], pour analyser les courbes de marée obtenues par le marégraphe auto-enregistreur (cf. § 8.2.4, p. 14 ; [45]) et évaluer la portée des phares sur les côtes [3], dans l'industrie textile [86], dans les problèmes hydrauliques ([24], [9]), comme pour traiter des questions de démographie ([84], [181]) ou d'assurances [137].

Au milieu du siècle, aussi bien le rapport favorable aux méthodes graphiques que donnent Cauchy, Beaumont et Lamé [21] à l'Académie des sciences en 1843, que la médaille d'or accordée à Lalanne en 1847 par les ingénieurs après la publication de son mémoire « Sur les tables graphiques et sur la géométrie anamorphique » dans les *Annales des ponts et chaussées* [85] marquent les premiers jalons d'une reconnaissance du calcul graphique dans les milieux tant académique que professionnel ([88], 2^e éd., p. 39).

8.2.2. Une impulsion majeure : les nouvelles voies de communication

Dès lors que se trouve abordée une étude contextualisée de l'apport des acteurs les plus significatifs de ce développement, il apparaît que les ingénieurs des Ponts et Chaussées y sont très impliqués [139]. Ils interviennent essentiellement dans la construction des nouvelles voies de communication, qui joue un rôle majeur et reconnu dans le processus d'industrialisation au XIX^e siècle. Routes, canaux, voies ferrées, ainsi que les ouvrages d'art – notamment les ponts suspendus – qui les articulent en réseaux, établissent l'unification territoriale et économique des pays qui s'industrialisent. S'ouvre ainsi une circulation extensive entre régions productives et centres de pouvoir, aussi bien en Europe qu'aux États-Unis. La construction de ces réseaux implique une coordination des activités et des moyens au niveau régional ou national, et suppose le déploiement d'une politique de rationalisation et de diffusion des compétences qui varie d'un pays à l'autre selon le type de relations qui s'y trouvent établies entre science, politique et industrie.

Comme le souligne Lalanne, la première impulsion majeure donnée à l'unification du calcul graphique vient essentiellement des réformes imposées ou soutenues par les nouveaux pouvoirs politiques en France, via l'administration des Ponts et Chaussées. Dès la Révolution, l'article 19 de la loi du 18 Germinal de l'an III de la République française prescrit la construction

d'échelles métriques propres à établir sans calcul les rapports entre les nouveaux poids et mesures et les anciens. L'avis du 22 frimaire de la Commission des poids et mesures, signé par Lagrange et Haüy, précise : « Au lieu des tables de rapports entre les anciennes et les nouvelles mesures, qui avaient été ordonnées par le décret du 8 mai 1790, il sera fait des échelles graphiques pour estimer ces rapports sans avoir besoin d'aucun calcul » ([88], 2^e éd., p. 55).

C'est pour répondre à cette prescription que Louis-Ézéchiél Pouchet (1748-1809) rédige un ouvrage dont les trois éditions ([143], [144], [146]) aux titres différents témoignent d'une rapide évolution. L'appendice de son *Traité de métrologie* de 1795 est un traité d'*Arithmétique linéaire*, qui fait l'objet d'une publication séparée la même année dans une version légèrement modifiée [145]. Dans la période d'institutionnalisation de la discipline, tous les auteurs – Lalanne, Favaro, Lallemand, d'Ocagne, etc. – affirmeront que Pouchet emploie déjà l'expression « calcul linéaire » ou « calcul graphique » l'installant ainsi *a posteriori* comme fondateur du domaine (cf. § 4.1.1).

La comparaison entre ces tables et les tracés topographiques conduit Lalanne à en percevoir le caractère général et unificateur. Mais c'est bien leur finalité, à savoir leur utilisation pour la construction de nouvelles routes et des chemins de fer, matérialisant la nouvelle unité du territoire, qui inaugure la substitution des tables graphiques aux tables numériques antérieurement établies par l'ingénieur et académicien Gustave-Gaspard de Coriolis (1792-1843), ainsi que la transformation introduite par Lalanne des abaques à lignes concourantes en abaques à droites concourantes, via les graduations fonctionnelles des axes. Dès les années 1830, « l'ouverture d'un réseau de routes habilement réparties sur l'étendue du territoire de la Manche » conduit l'administration à distribuer un volume des tables numériques de Coriolis à tous les ingénieurs pour le calcul des volumes de terre des déblais et remblais. La loi du 11 juin 1842 décide l'établissement d'un réseau de chemins de fer « qu'il s'agissait d'exécuter promptement », en utilisant « des procédés expéditifs pour évaluer les terrassements considérables que comportent les travaux de ce genre ». L'année même où Lalanne publie son mémoire sur la « substitution des plans topographiques à des tables numériques » [83], dans une circulaire du 2 septembre 1843, le sous-secrétaire d'État aux Travaux publics adresse à tous les préfets et à tous les ingénieurs deux feuilles de tables graphiques relatives aux chemins de fer à deux voies, tandis que des tables du même genre pour les projets de chemins vicinaux sont envoyées par le ministre de l'Intérieur. Lalanne dresse également des tables graphiques pour les études relatives à l'établissement d'une ligne à une et deux voies dans le centre de la France et, dix ans plus tard, sous l'impulsion de Napoléon III, pour le développement des lignes de chemins de fer dont il a la direction : en France, pour les réseaux du Nord, de l'Est et de l'Ouest, ainsi qu'en Suisse ([88], 2^e éd., p. 15-18). Ce calcul du volume des déblais et remblais, qui fut déjà

une préoccupation de Monge, restera un problème crucial pour les ingénieurs des Ponts et Chaussées tout au long du XIX^e siècle, où il nourrira également le développement de l'utilisation des planimètres [1]. Les *Annales des ponts et chaussées* regorgent d'articles sur la question, publiés par des ingénieurs dont les plus connus sont Cousinery et le polytechnicien Charles-Étienne Collignon (1802-1885), qui obtiendra des concessions pour construire des lignes de chemins de fer en Russie après la guerre de Crimée (1854).

L'établissement de nouvelles voies de communication se soutiendra de l'extension des méthodes graphiques et graphomécaniques de calcul aussi bien au XIX^e qu'au XX^e siècle. Au XIX^e siècle, les réseaux de communication accompagnent une circulation matérielle des personnes et des biens essentielle au développement industriel. Du Portugal à la Russie, ils constituent l'axe fondamental de la modernisation. Le télégraphe et le téléphone tisseront bientôt d'autres types de réseaux, où la mécanisation des méthodes de calcul graphique jouera un rôle tout aussi essentiel jusqu'à la naissance de l'informatique (cf. § 8.4).

8.2.3. Un développement spécifique : la statique graphique et la construction des ponts

La création de la statique graphique suit un schéma encore plus caractéristique de l'importance des grands travaux dans les modalités de création de cette nouvelle discipline. Il existe bien, depuis le XVII^e siècle, des approches graphiques du polygone funiculaire pour la détermination des conditions d'équilibre et de stabilité d'un corps formé de plusieurs cordons soumis à plusieurs forces en des points différents. Mais l'existence d'une transmission effective entre ces différentes études est difficile à déterminer (cf. § 5.1). La naissance de la statique graphique est concomitante de la construction des ponts suspendus. Celle-ci relève d'une technique issue des États-Unis, et introduite successivement en Angleterre, en France, et ensuite seulement dans les autres pays d'Europe. La statique graphique verra finalement le jour en Suisse, et cette longue maturation renvoie à l'impact de la formation des ingénieurs sur les méthodes qu'ils élaborent.

Héritier de l'école de Monge, le polytechnicien et officier du génie Jean-Victor Poncelet (1788-1867), qui a fortement marqué la science industrielle française du milieu du siècle, a déjà développé des méthodes graphiques d'étude du polygone funiculaire pour le cas des ponts suspendus. Il les a enseignées à plusieurs reprises : dans son cours de mécanique appliquée aux machines (1825-1834) à l'École de l'artillerie et du génie de Metz, dans son cours du soir de mécanique industrielle (1827-1830) à la mairie de cette même ville et, dix ans plus tard, dans son cours de mécanique physique et

expérimentale à la Sorbonne (1838-1848). Mais il n'existe de ces cours que des versions lithographiées ou rédigées par ses successeurs ([22], [23]).

Il appartiendra donc à Culmann de fonder la statique graphique par sa publication en 1866 de *Die graphische Statik* [27], et d'élaborer à ce propos des concepts qui sont toujours mis en œuvre aujourd'hui. Il est alors professeur des sciences de l'ingénieur à l'Institut fédéral de Zürich, depuis sa fondation en 1855. Il en deviendra directeur en 1872. Il y théorise les méthodes graphiques introduites par Poncelet, qu'il a apprises au cours de ses études à l'École de l'artillerie et du génie de Metz, puis au Polytechnikum de Karlsruhe, où son professeur enseigne la méthode du polygone funiculaire, adaptée de son enseignement en France. Culmann a mis concrètement ces méthodes à l'épreuve lors de son long voyage en Angleterre, en Irlande et aux États-Unis (1849-1851), où il a comparé la construction des ponts en bois et des ponts en acier à ceux d'Europe. Il s'agit de concevoir le modèle optimum de ces ponts et, plus généralement, des constructions métalliques qui accompagnent alors l'extension des chemins de fer. Culmann s'appuie sur la géométrie projective – notamment sur la *Geometrie der Lage* [160] de Carl Georg Christian von Staudt (1798-1867) – pour présenter le calcul graphique comme un tout, introduisant systématiquement l'usage des méthodes graphiques dans l'étude de toutes sortes de structures : voûtes, poutres, armatures de toits, arches, murs de soutènement. Un cours spécial de statique graphique devient obligatoire à Zürich. Ses méthodes sont rapidement assimilées par les concepteurs de ponts et de structures, qui apprécient l'économie de temps des méthodes graphiques. Maurice Koechlin (1856-1946), élève et émule de Culmann à Zürich, en est un exemple remarquable. Embauché par Gustave Eiffel (1832-1923) en 1879 comme chargé d'études⁸ pour succéder à son associé Théophile Seyrig (1843-1923) qui vient de le quitter, il est l'auteur des plans du viaduc de Garabit (1878-1884) et de la tour Eiffel (1887-1889), construite pour l'exposition universelle célébrant à Paris le centenaire de la Révolution française. Symboles du nouvel âge d'or de l'acier, ces réalisations – sans oublier la statue de la « Liberté éclairant le monde » – témoignent efficacement et dans le monde entier, de l'impact du calcul graphique dans ce nouveau type de constructions en treillis.

Dès lors qu'elle est constituée comme un champ théorique autonome, la statique graphique envahit de nombreux domaines fort éloignés de son champ d'étude initial, jusqu'à traiter par exemple de questions de calcul des primes d'assurances, en interprétant les solutions d'équations différentielles ou aux différences finies comme solutions de problèmes fictifs de statique se prêtant à l'emploi du polygone funiculaire.

8. Koechlin assurera la direction générale de l'entreprise lorsque Eiffel prendra sa retraite, et en deviendra président après 1930.

8.2.4. Calcul graphomécannique : de la maîtrise du territoire à celle des océans

Le développement des planimètres et intégraphes, comme celui des différents aspects du calcul graphique, ne s'est pas produit uniformément dans l'ensemble des pays alors en voie d'industrialisation. La Grande-Bretagne, pourtant première puissance économique du monde au milieu du XIX^e siècle, semble d'abord moins concernée par ces méthodes et ces instruments de calcul. Si l'initiative en ce domaine revient à l'évidence au Continent (cf. § 5.1 et chap. 6), la Grande-Bretagne va pourtant rapidement s'approprier ces instruments, et surtout les insérer dans des machines plus complexes, en relation étroite avec ses besoins de grande puissance industrielle et maritime.

Le calcul graphomécannique et son utilisation pour mesurer la puissance des machines y trouvent un terrain de développement très favorable. Les planimètres sont présents à la première exposition universelle de Londres en 1851, dont le planimètre de l'ingénieur écossais John Sang (1809-1887), de fabrication locale (cf. § 6.2.7). Mais surtout, les dynamomètres mis au point en France par les ingénieurs savants Poncelet et Arthur-Jules Morin (1795-1880), y sont remarqués par le révérend Henry Moseley (1801-1872), professeur de philosophie naturelle et d'astronomie au King's College de Londres, qui a déjà présenté en 1841 un rapport sur le sujet devant la British Association for the Advancement of Science (BAAS) [32]. Ces dynamomètres, qui reprennent le système intégrateur du planimètre à disque, seront largement utilisés pour mesurer aussi bien le travail des chevaux que celui des machines dans l'industrie [31].

C'est à cette même exposition que le physicien James Clerk Maxwell (1831-1879), découvrant le planimètre à cône de Sang et celui de Tito Gonnella (1794-1867) (cf. § 6.2.2), souligne la difficulté matérielle du double mouvement de roulement et de glissement de la roulette sur le cône, et envisage d'autres systèmes de transmission des mouvements, notamment par l'intermédiaire de deux sphères [110]. Ses propositions nourriront l'invention par l'ingénieur James Thomson du système intégrateur disque-sphère-cylindre, dont son frère William, le futur Lord Kelvin, fera l'élément central de l'analyseur harmonique (cf. § 6.12.1).

De fait, l'élaboration de cette machine participe en Grande-Bretagne d'un projet plus vaste de recherches théoriques en astronomie physique ([97], [99]) et d'observations du régime de marées, mené de front par la Royal Society et la BAAS, depuis la création de celle-ci en 1831. Il se concrétise par la publication de nombreux articles dans les journaux et rapports de ces deux sociétés ([98], [100], [101], [102], [103], [104], [105], [106]), et mobilise mathématiciens, astronomes, ingénieurs civils et officiers de la Royal Navy. Il aboutit à la création d'un comité de la BAAS, qui se réunit de 1867 à 1876 sous la présidence de William Thomson, afin de « promouvoir l'exten-

sion, l'amélioration et l'analyse harmonique de l'observation des marées » [165]. L'analyse harmonique, ainsi que les données observationnelles astronomiques et maritimes, s'y trouvent complétées par le travail conjoint de trois machines :

1) Le marégraphe auto-enregistreur, mis au point par l'ingénieur John Palmer [135] et présenté à la Royal Society en 1831, révolutionne, à la fois quantitativement et qualitativement, le recueil des données d'observation en fournissant le tracé continu des courbes de marée par enregistrement graphique. Comme l'écrit Lalanne (cf. § 8.2), l'ingénieur hydrographe Antoine-Marie-Rémi Chazallon (1802-1872), qui fonde l'*Annuaire des marées* en 1839, produit la même année un autre marégraphe auto-enregistreur, dont il équipe les principaux ports en France et dans les colonies françaises. Mais les historiographies française et britannique sur le sujet s'ignorent totalement l'une l'autre.

2) L'analyseur harmonique donne autant de termes de la décomposition de la courbe de marée qu'il possède de systèmes intégrateurs : chaque système disque-sphère-cylindre fournit un coefficient de la décomposition pour les différentes composantes lunaires et solaires de marée, ceci en obtenant mécaniquement l'intégrale du produit de cette fonction par une fonction sinus ou cosinus.

3) Enfin, le prédicteur de marées recompose les harmoniques ainsi obtenus en une fonction périodique et peut produire en quatre heures de fonctionnement la prédiction des marées à venir pour une année.

Cette analyse harmonique des marées s'appuie sur une campagne d'observations menées à la fois localement et dans les territoires nouvellement explorés – Inde, Amérique, Afrique du Nord –, où il s'agit d'assurer la sécurité de navigation des navires près des côtes dont le régime de marées est mal connu, et surtout très différent de celui des ports domestiques et de l'Atlantique. Elle jouera un rôle majeur dans l'exploration et la maîtrise des nouveaux territoires des empires coloniaux britannique et français. L'analyseur harmonique de Kelvin étant très complexe, fort volumineux et de fabrication coûteuse, il sera assez vite remplacé par des analyseurs plus maniables et moins onéreux, comme ceux d'Olaus Henrici (1840-1918), fabriqués en Suisse par la firme Coradi, et d'Otto Mader (1880-1944), fabriqués d'abord par la firme des frères Stürzl, puis par la firme Ott (cf. § 6.12). Ces nouveaux appareils seront utilisés au xx^e siècle dans tous les domaines d'application de l'analyse harmonique jusqu'à l'arrivée des ordinateurs sur le marché dans les années 1970. Quant aux prédicteurs de marées, ils seront fabriqués mondialement, avec un nombre de composantes en constante augmentation. L'entreprise Kelvin and White de Glasgow – devenue Kelvin, Bottomley and Baird – en exportera en Argentine, au Brésil, au Japon, dans les années 1910 et en produira jusque dans les années 1960, sous la houlette

du Liverpool Tidal Institute. D'autres seront fabriqués indépendamment aux États-Unis et en Allemagne. Remplacés eux aussi par les ordinateurs dans les années 1960, ils ont largement alimenté l'élaboration des cartes cotidales, à partir d'une première trame dessinée par John W. Lubbock (1803-1865) en 1831 et des nombreux articles que publie William Whewell (1794-1866) sur le sujet dans les *Philosophical Transactions* de 1833 à 1850 ([183], [184], [185], [186]). Le réseau des lignes cotidales, qui joignent sur le globe les lieux où la pleine mer a lieu en même temps, ouvre la voie d'une compréhension globale du régime planétaire des marées.

Si le calcul graphique se développe largement dans le milieu des ingénieurs, ces premiers éléments d'enquête indiquent des disparités manifestes entre les différents lieux où il se met en place, disparités dont la seule histoire des idées ne suffit pas à rendre compte. Si les besoins spécifiques de ces ingénieurs sont sensiblement les mêmes lorsqu'ils travaillent à établir les grands réseaux de communication, leur travail s'insère cependant dans des politiques bien distinctes d'un pays à l'autre, et d'une période à une autre. Ainsi, les ingénieurs français du début du siècle travaillent dans l'administration des Ponts et Chaussées, où ils sont directement chargés de grands projets nationaux, portés par un nouveau pouvoir politique qui tend à coordonner le développement des voies de communication. Vers la fin du même siècle, un physicien comme Lord Kelvin en Grande-Bretagne peut s'appuyer sur sa propre pratique de physicien et d'industriel⁹, et sur un tissu social où science et industrie entretiennent déjà des relations suivies, notamment par le biais de la BAAS. À l'évidence, l'identité sociale des ingénieurs se construit au XIX^e siècle dans des contextes marqués par les particularités historiques de l'industrialisation et de la structuration des états. Ce sont les modalités de cette construction qu'il s'agit maintenant d'examiner et de confronter avec le statut accordé au calcul graphique dans chaque cas. Cette confrontation permettra de mettre en lumière la multiplicité des significations que ces méthodes de calcul sont susceptibles de revêtir au delà de leur seul contenu technique, et de renchérir sur les statuts respectifs de l'ingénieur et du mathématicien.

8.3. Vers une culture d'ingénieur transnationale

L'importance des ingénieurs dans le processus d'élaboration du calcul graphique offre un éclairage nouveau sur l'oubli qui le touche. Outre l'aspect

9. Si Kelvin est professeur de philosophie naturelle à Glasgow depuis 1846, il ne faut pas négliger le fait qu'il est aussi directeur de l'Atlantic Telegraph Company depuis 1856, et qu'il a dirigé l'installation du premier câble transatlantique dans les années 1860, avant de créer la firme Kelvin and White, qui fabrique de nombreux instruments de précision pour l'électricité et le télégraphe.

rétrohistorique de l'historiographie traditionnelle déjà évoqué, la hiérarchie qui structure les savoirs scientifiques induit une histoire des mathématiques plus attachée à l'analyse des conditions de production des édifices théoriques qu'à celle des méthodes de calcul. L'historiographie tend ainsi à effacer le rôle de l'ingénieur, même s'il est de mieux en mieux formé aux mathématiques. Il reste aussi assez souvent invisible sur le terrain, où il s'efface encore devant le maître d'ouvrage – le politique – et le maître d'œuvre – l'architecte – tout comme devant le patron dans l'industrie. L'échec d'une entreprise lui sera volontiers reproché, sans que la réussite ne lui en soit attribuée. L'urgence est donc ici de redonner à ces acteurs la visibilité dont l'histoire des mathématiques tend à les priver.

Dans le travail de maîtrise et de restructuration de l'espace tel qu'il s'organise dans les pays en voie d'industrialisation au XIX^e siècle, les ingénieurs interviennent en première ligne, non seulement en tant qu'acteurs, mais aussi sur le plan épistémologique, au cœur même des processus de mathématisation du réel. La montée de l'industrialisation encourage les perspectives empiristes. En ce sens, et au moins dans un premier temps, les ingénieurs sont d'ailleurs plus directement impliqués que les mathématiciens. Lalanne ne parle-t-il pas des lois empiriques constatées sur le terrain ([88], p. 29, 57), dont l'expression mathématique n'est pas connue, mais dont les abaques vont pouvoir concentrer les données et signifier la continuité dans les variations des phénomènes observés ?

Cette industrialisation s'accompagne de restructurations politiques, vécues comme progressistes, dont ces ingénieurs, hommes de l'art et hommes de terrain, sont souvent partie prenante, soit qu'ils s'y investissent directement, soit qu'ils occupent des postes d'enseignement où ils œuvrent à la fois à l'institutionnalisation de ces nouveaux savoirs et à la légitimation de ces nouveaux pouvoirs.

8.3.1. L'implication politique des ingénieurs face à l'ambition du progrès social et scientifique

L'implication des ingénieurs dans les affaires politiques peut aller des marques de reconnaissance du pouvoir à une participation directe au renouvellement de ses structures. Des exemples significatifs peuvent être répertoriés dans tous les pays en voie d'industrialisation, où se déploie toute la palette des possibles, allant d'ingénieurs aujourd'hui plutôt inconnus à d'autres qui sont reconnus pour des travaux en dehors du calcul graphique.

En France, avant de faire carrière comme expert en mécanique industrielle, l'ingénieur militaire Arthur-Jules Morin fut d'abord exclu de l'École polytechnique pour avoir participé à la défense de Paris en 1814. Les dynamomètres qu'il met au point, fondés sur le même principe intégrateur

que les planimètres, vont jouer un rôle déterminant dans l'évaluation de la puissance des machines et l'élaboration du concept de travail dans les usines, en France comme à l'étranger (cf. § 8.2.4). Devenu en 1839 titulaire de la nouvelle chaire de mécanique appliquée à l'industrie au CNAM, établissement qu'il dirigera de 1849 à sa mort, cet ingénieur-savant, général depuis 1855, y créera le premier laboratoire de mécanique industrielle. Membre du Conseil supérieur de l'instruction publique (1851-1861), il travaillera activement à intégrer les applications industrielles à l'enseignement des sciences, une intégration qui deviendra un enjeu crucial pour l'Association française pour l'avancement des sciences, créée en 1872 sur le modèle de la BAAS après la défaite de 1870 [52]. Son rapport d'enquête de 1867 sur l'enseignement technique en France et dans plusieurs pays européens, avec son projet de refonte totale de l'enseignement en un système unique, restera cependant lettre morte avant d'inspirer la réforme de Jules Ferry [47].

Dans le *Dictionary of Scientific Biography* [73], Jean Itard indique bien que d'Ocagne, élu membre de l'Académie des sciences en 1922, enseigne la géométrie à l'École polytechnique à partir de 1912, mais il oublie de dire que d'Ocagne a travaillé en ingénierie navale et qu'il fut d'abord adjoint au directeur du Service du nivellement général de la France de 1891 à 1901, puis inspecteur général des Ponts et Chaussées en 1920. Cet oubli est d'autant plus regrettable que l'auteur des abaques hexagonaux (cf. § 4.1.5), le géodésien Charles Lallemand (1857-1938), fut lui aussi directeur de ce même Service du nivellement général de la France de 1884 à 1928. Itard gomme ici une ligne de transmission des recherches sur le calcul graphique, évacuant du même coup un point d'ancrage essentiel dans l'élaboration des nomogrammes.

En Italie, Cremona participe à la défense de Venise contre l'Autriche pendant le *Risorgimento* avant d'être nommé professeur à l'Institut technique de Milan en 1867 par décrets royaux au moment de l'unification de l'Italie, puis en 1873 directeur du nouvel Institut polytechnique du génie à Rome – où il va enseigner la statique graphique.

Les mêmes implications politiques sont à l'œuvre lorsque l'Espagnol Torres Quevedo, lui-même fils d'un ingénieur des chemins de fer, interrompt ses études en 1873-1874 pour s'engager comme volontaire dans la défense de Bilbao pendant la troisième guerre carliste. Il travaillera dans la même compagnie que son père avant de s'engager dans la recherche technologique et la fabrication d'instruments et de machines, dont les dirigeables Astra-Torres acquis par les armées française et britannique pendant la Première Guerre mondiale. Spécialiste international du transport par câble¹⁰ depuis 1887, il est reconnu pour avoir exploré jusqu'aux automates et au radiogui-

10. On lui doit notamment les téléphériques de Rio de Janeiro et des chutes du Niagara, qui fonctionnent toujours aujourd'hui.

dage les nouvelles possibilités offertes par les techniques électromagnétiques. C'est donc dans le cadre beaucoup plus vaste de ces recherches technologiques transnationales qu'il faut situer son invention de l'automate joueur d'échecs (cf. § 8.1).

Les ingénieurs investis dans la réalisation des grands travaux civils ou militaires constituent ainsi une technocratie proche du pouvoir politique, à laquelle appartiennent les acteurs du calcul graphique. Bruno Belhoste [11] et Antoine Picon [139] ont particulièrement étudié leur situation pour ce qui concerne respectivement Polytechnique et les Ponts et Chaussées. Mais cette proximité du pouvoir politique existe dans les autres pays d'Europe, même si ces mêmes acteurs cherchent en fait leur reconnaissance sociale plutôt dans leur travail que dans la politique. Cremona refuse ainsi le poste de secrétaire général de la nouvelle République italienne que lui offre le ministre de l'Agriculture en 1873. De même Torres Quevedo déclinera le poste de ministre du Développement dans l'Espagne de 1918. Et si Favaro, après sa formation d'ingénieur, se tourne finalement vers l'enseignement et l'histoire des sciences, son projet éditorial des œuvres de Galilée, approuvé par le ministère de l'Instruction publique en 1887, n'est pas exempt de visée politique dans le contexte de l'unification culturelle de l'Italie naissante. Au xx^e siècle, le développement des sciences de l'ingénieur et l'apparition de nouvelles sciences expérimentales aux implications économiques et politiques rendront plus prégnantes encore ces interactions entre ingénierie et politique (cf. § 8.5).

8.3.2. La circulation des savoirs de l'ingénieur

Depuis le xviii^e siècle, les voyages exploratoires constituent un vecteur de diffusion privilégié dans la formation des ingénieurs, qui tantôt s'informent ainsi sur les dernières réalisations techniques afin de les introduire dans leur propre pays, tantôt sont appelés à l'étranger. Au xix^e siècle, ces voyages vont se transformer progressivement en missions d'études financées par les gouvernements – pour les travaux publics – ou les entreprises – pour les usines. Leurs objectifs sont plus structurés, qui vont de l'expertise au transfert de technologie, voire à l'espionnage. À travers cette multiplication des échanges se construit une communauté transnationale partageant une culture commune. De telles missions, d'Agustín de Betancourt y Molina ¹¹

11. Commissionnaire du gouvernement espagnol de 1786 à 1791, Betancourt dirige un groupe de stagiaires affectés à l'École des ponts et chaussées à Paris. C'est de Paris qu'il est envoyé en mission en Angleterre par le gouvernement espagnol en 1788 pour visiter les usines Boulton qui fabriquent la machine à vapeur de Watt [54].

(1758-1824) à Torres Quevedo¹², partent ainsi de l'Espagne et du Portugal, notamment vers l'Angleterre¹³ et la France.

Dès 1809, le tsar de Russie Alexandre I^{er} fait appel à des ingénieurs d'État pour créer à Saint-Petersbourg la première grande école d'ingénieurs de l'empire russe, l'ICIVC (Institut du Corps des Ingénieurs des Voies de Communication)¹⁴, spécialisée dans les travaux hydrauliques et dont les modèles de référence seront l'École polytechnique et l'École des ponts et chaussées de Paris, ainsi que l'Escuela de caminos y canales de Madrid, créée en 1802. Ce groupe transnational réunit des ingénieurs très qualifiés : outre l'Espagnol Betancourt, le Hollandais Franz Dewollant (1752-1818), déjà impliqué dans la fortification des villes de la frontière sud de la Russie, le polytechnicien français Pierre-Dominique Bazaine (1786-1838), ingénieur des Ponts et Chaussées, mais aussi Gabriel Lamé (1795-1870) et Benoît-Paul-Émile Clapeyron (1799-1864) – tous deux polytechniciens et membres du corps des Mines –, dont d'Ocagne identifiera les recherches sur le polygone des forces comme antécédents à la statique graphique de Culmann.

Journaux et traités circulent à travers toute l'Europe et au delà des mers, dessinant les contours d'une culture commune fondée sur la connaissance des lois de la nature : celles de la mécanique au début du XIX^e siècle, s'élargissant aux lois de la physique au cours du même siècle – chaleur, hydraulique, électricité, électromagnétisme. Des maisons d'édition spécialisées dans les ouvrages destinés aux ingénieurs vont publier les premiers ouvrages sur le calcul graphique. À Paris par exemple, Gauthier-Villars, imprimeur libraire de l'École polytechnique, édite les *Leçons de statique graphique* de Favaro, traduites par l'ingénieur des arts et manufactures Paul Terrier ([43], [44]). La traduction de *Die Graphische Statik* de Culmann en 1880 [28] est soutenue par une souscription du ministère des Travaux publics et paraît chez Dunod, libraire des corps nationaux des ponts et chaussées, des mines et des télégraphes.

Mais surtout, c'est dans les très nombreux journaux créés tout au long du siècle, qu'ils soient l'expression d'un corps d'État ou d'un corps professionnel organisé en société, que sont publiés les articles sur le calcul graphique avant qu'il ne s'affirme comme discipline dans les années 1880. Leur nombre est impressionnant, surtout en France et en Angleterre, mais leur répartition irrégulière traduit des modes différents dans la constitution de cette profession.

12. Ainsi Torres Quevedo parcourt-il l'Europe pour suivre les derniers développements industriels, notamment dans le domaine de l'électricité.

13. L'Angleterre est également une destination privilégiée pour les formateurs et les étudiants des instituts techniques allemands, en particulier ceux de l'Institut de formation technique de Dresde (1828), qui deviendra Institut polytechnique en 1851 ([118], p. 323-326 ; cf. § 8.3.3, p. 24).

14. L'ICIVC sera réorganisé par Ostrogradsky à partir de 1830 [54].

En France, il faut mentionner, pour les revues d'ingénieurs qui publient des articles sur le calcul graphique et graphomécanique : les *Annales des mines* (1801), le *Mémorial du département général de la guerre* (1803), le *Mémorial de l'officier du génie* (1803), le *Mémorial de l'artillerie* (1826) et les *Annales des ponts et chaussées* (1831), longuement citées par Lalanne [88] et où d'Ocagne publiera en 1884 sa transformation des abaques à droites concourantes en nomogrammes à points alignés [127]. Les *Annales du Conservatoire des arts et métiers*, le *Mémorial du génie maritime* (1847), les *Annales hydrographiques* (1848) et les *Annales télégraphiques* (1843) publient également certaines applications de la nomographie.

En Grande-Bretagne, les revues et les sociétés d'ingénieurs pullulent, comme en témoigne Henry Selby Hele Shaw (1854-1941) dans les années 1890, dans les rapports d'enquête ([69], [70], [71]) où il répertorie pour la BAAS tous les domaines de la science où interviennent les méthodes graphiques sur l'ensemble du territoire. Cette enquête vise d'ailleurs à comprendre pourquoi le calcul graphique n'émerge pas comme discipline en tant que telle dans ce pays, malgré les nombreux usages de ce type de représentation. Il s'agit pour la plupart de journaux provinciaux, directement liés à des milieux professionnels ou aux nouveaux centres industriels, comme : *Engineer, Engineering, Industries, Journal of Iron and Steel Institution, Marine Engineers, Proceedings of the Literary and Philosophical Society of Manchester, Proceedings of the Midland Institution of Mining, Civil, and Mechanical Engineers*, mais aussi de journaux des ex-colonies, comme les *Proceedings of the New England Institution of Mining Engineers*. D'autres, installés à Londres, ont davantage une vocation unificatrice, qu'ils soient représentatifs de corps d'État, comme les *Minutes of the Proceedings of Royal Art Institution, Papers of Royal England Institution*, ou de sociétés d'ingénieurs, comme les *Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Electrical Engineer*, expressions des sociétés de même nom ([53], [164]) fondées¹⁵ respectivement en 1835, 1847 et 1871. C'est dans les *Minutes of the Proceedings of the Institution of Civil Engineers* que William Thomson donne en 1882 un compte rendu détaillé et longuement discuté [171] des trois appareils destinés à la prévision des marées (cf. § 8.2.4). Quoi qu'il en soit, alors que Hele Shaw prône l'établissement d'une formation d'ingénieurs plus unifiée, l'absence de coordination est telle que cette multiplicité des revues spécialisées crée un effet de dispersion – dont les enjeux seront examinés plus loin (cf. § 8.4) – qui semble œuvrer

15. Les études historiques donnent des dates différentes pour la création de la première. Or, l'historique de 1885 distingue cette institution de la société fondée par John Smeaton en 1771, et minimise le moment de sa création en 1818. Elle préfère célébrer la date où elle s'est « annoncée au monde » avec la publication des *Proceedings*.

a contrario dans la constitution du calcul graphique en tant que discipline de ce côté de la Manche.

Dans les autres pays européens, les publications relatives au calcul graphique interviennent plus tardivement, alors qu'est revendiqué son statut de discipline à part entière dans les années 1880. À l'exception de Massau, qui publie ses travaux sur l'intégration graphique dans les *Annales de l'Association des ingénieurs sortis des écoles spéciales de Gand* en Belgique ([108], [109]), les publications sur le calcul graphique ont alors lieu dans des revues et journaux à diffusion plus large, se voulant universelle, comme la *Revue universelle des mines* ou la *Revue scientifique de la France et de l'étranger*, mais surtout dans les journaux spécialisés de mathématiques ou de physique, qui naissent aussi au XIX^e siècle et sont lus au delà des frontières nationales, comme les *Memorie della Reale Accademia delle scienze di Torino* en Italie, ou le *Zeitschrift für Mathematik und Physik* en Allemagne. Les journaux qui traitent de mathématiques « pures et appliquées », comme les *Annales de Gergonne*, le *Journal de Crelle* et le *Journal de Liouville*¹⁶, sont davantage concernés, mais les *Comptes rendus de l'Académie des sciences* jouent également un grand rôle en France dans la rencontre entre savoir des ingénieurs et savoir des mathématiciens. Nombre de ces comptes rendus concernent directement le sujet précis du calcul graphique et graphomécanique ([83], [21], [87], [30], [173], [90], [91], [134], etc.).

À partir du milieu du XIX^e siècle, aux voyages d'études et aux publications s'ajoutent les expositions universelles, voire des congrès spécifiques d'ingénieurs, qui représentent des événements considérables pour la circulation des savoirs, mais aussi le début d'une unification de cette culture d'ingénieurs¹⁷.

La classification générale des objets admis à l'exposition universelle de 1878, qui fait état de la classification des enseignements des nouvelles méthodes graphiques en France selon leur niveau d'utilisation, rend compte du rôle essentiel acquis par les méthodes graphiques de calcul dans l'élaboration de nouveaux objets :

D'après la classification générale des objets admis à l'Exposition Universelle de 1878, les modèles et résultats variés de l'application des nouvelles méthodes graphiques, dont la majeure partie a été décrite ou mentionnée dans la présente notice, appartiennent à différentes classes, savoir : à la classe 6, pour l'enseignement primaire (Abaque simple) ; à la classe 7, pour l'enseignement secondaire (Abaque plus complet, tables diverses obtenues par l'anamorphose, épures pour la résolution des équations par le tracé des

16. Leurs dénominations officielles sont respectivement : *Annales de mathématiques pures et appliquées*, *Journal für die Reine und Angewandte Mathematik*, *Journal de mathématiques pures et appliquées*.

17. On a vu le rôle essentiel de la première exposition universelle de 1851 à Londres dans la diffusion des dynamomètres et la genèse de l'analyseur harmonique en Grande-Bretagne (cf. § 8.2.4, p. 13).

lignes droites) ; à la classe 8 pour l'enseignement supérieur (mêmes objets et méthodes que la classe 7, complétés et envisagés dans leurs relations avec la géométrie et l'analyse) ; à la classe 66, comme faisant partie du matériel et des procédés employés dans les Travaux Publics pour l'étude et la rédaction des projets de routes et de chemins de fer, etc. ; et surtout à la classe 15, en tant qu'instruments de calcul. Mais on a pensé que la théorie des tables spéciales qui intéressent l'instruction et les Travaux Publics ne devait point être présentée isolément : il importait moins de vulgariser un procédé que de faire ressortir l'esprit et la généralité des principes dont il découle ([88], p. 62-63).

La reconnaissance du calcul graphique comme discipline à part entière coïncide dans le temps avec la structuration de la profession d'ingénieur et de ses modes d'organisation. Des scissions et des manifestations différentes de ce calcul sont néanmoins constatées, qui peuvent être analysées au regard des différents types de formation qui sont alors mises en place. Les historiens insistent à juste titre sur le fait qu'au XIX^e siècle l'ingénieur civil prend le pas sur l'ingénieur militaire. Mais la naissance du calcul graphique est plutôt attachée à la nature des projets d'ingénierie qu'au statut des ingénieurs eux-mêmes (cf. § 8.2). Dans la seconde moitié du XIX^e siècle, au moment où cette discipline atteint la reconnaissance, le statut des mathématiques dans les formations d'ingénieurs va peser sur la pérennité et l'extension de ces méthodes. L'équilibre entre savoirs pratiques et savoirs théoriques en dépend : de la situation du curseur entre les deux peuvent découler des approches différentes et des développements différenciés.

8.3.3. « Polytechnique » : une acception polysémique

Si la formation des ingénieurs cherche à répondre aux exigences communes du travail sur le terrain – devenu industriel – par la mise en œuvre d'un savoir qui s'affirme comme scientifique, elle rencontre aussi des situations spécifiques dans la mesure où elle s'intègre localement à des systèmes institutionnels eux-mêmes marqués par leur histoire. Ces conditions locales ne manquent pas d'introduire certaines disparités dont l'analyse peut aider à comprendre la façon hétérogène dont le calcul graphique s'affirme – ou non – dans les différents pays industrialisés.

S'ouvrent alors en Europe bon nombre d'instituts polytechniques, officiellement créés sur le « modèle français ». Ce modèle est celui de l'École polytechnique, créée en 1794. De nombreux historiens ont déjà souligné l'ambiguïté de son nom. Ouverte sous l'impulsion principale de Gaspard Monge (1746-1818) en période révolutionnaire, avec une forte ambition polyvalente et praticienne, elle s'est très vite coupée de ses écoles d'application civiles – comme l'École des ponts et chaussées et l'École des mines – autant que militaires – comme l'École de l'artillerie et du génie de Metz – qui ont reconstitué de fait les anciennes écoles d'ingénieurs. L'École polytechnique

promeut alors un enseignement de haut niveau, dominé par l'analyse mathématique, réputée suffisamment générale et théorique pour conduire et légitimer toutes les applications possibles. Cet enseignement exclusivement théorique de deux ans est ensuite complété, du point de vue pratique, dans les écoles d'application. Si cette configuration n'empêche pas certaines interactions fructueuses, elle soumet globalement la pratique à la théorie, y compris en mathématiques, où l'enseignement est d'abord centré sur le calcul différentiel et intégral, avant d'aborder les applications. En mathématiques comme en physique, on cherche « à évacuer les théories incertaines et à en réduire l'enseignement au seul exposé des procédures d'expérience et d'observation conduisant aux lois des phénomènes » ([11], p. 291).

Ce modèle est réputé avoir influencé la création des écoles d'ingénieurs dans toute l'Europe ([11], [53]), aussi bien à Prague – où l'Université technique, fondée en 1717, est réorganisée en 1806 sur le modèle français – qu'à Vienne, Stockholm, Zürich, Copenhague, Karlsruhe, et jusqu'aux États-Unis – où l'académie militaire de West Point est fondée en 1802. Dans ces établissements, l'enseignement de la théorie et celui de la pratique ont lieu conjointement. Mais, en dépit de l'apparente unité que constituent leur dénomination commune d'« instituts polytechniques » et du rôle central qu'y jouent les mathématiques, la formation qu'ils offrent est loin d'être monolithique. De fait, ces instituts ne sont pas nécessairement structurés de la même manière que l'École polytechnique en France. Ils ne disposent pas de la situation de monopole dans la formation des ingénieurs d'État qu'a connue cette dernière au moment de sa création et qu'elle a continué d'occuper en France tout au long du XIX^e siècle. Au contraire, leur statut diffère selon qu'ils adhèrent à l'ambition originelle ou à la réalité de leur modèle, et selon qu'ils s'adaptent au niveau des élèves ou imposent *a priori* des critères pour la formation d'une élite. Créés plus tardivement en Europe tout le long du siècle, ils rencontrent également d'autres réalités techniques, industrielles et politiques.

Parmi les pays d'Europe où s'institutionnalisent ces formations d'ingénieurs, on peut ainsi distinguer deux catégories très caractéristiques quant aux contextes où s'établissent les méthodes graphiques et aux écoles où elles sont enseignées. Les instituts polytechniques créés dans la première moitié du XIX^e siècle le sont en effet sur le modèle de l'école militaire d'élite. Ils forment essentiellement des ingénieurs militaires d'État, parfois qualifiés d'ingénieurs civils lorsqu'ils ont en charge les travaux publics (routes, canaux, chemins de fer). Ainsi la Escuela de caminos y canales¹⁸ est fondée à Madrid en 1802. Et l'ICIVC de Saint-Pétersbourg (cf. § 8.3.2) est de même un corps

18. Elle fermera en 1808 au moment de l'invasion des troupes napoléoniennes.

d'ingénieurs civils entièrement militarisé, qui servira de modèle aux autres établissements supérieurs techniques en Russie.

Dans la seconde moitié du siècle, les instituts polytechniques répondent davantage aux besoins d'une industrie plus demandeuse et forment essentiellement des ingénieurs civils au sens strict du terme, c'est-à-dire répondant aux exigences de plus en plus diversifiées de la société civile, à savoir des entreprises privées. Ils correspondent davantage à l'École centrale des arts et manufactures de Paris et sont intégrés, tantôt dans les écoles techniques supérieures (*Technische Hochschule* en Allemagne), tantôt à l'université. C'est le cas de l'École des arts et manufactures de Liège (1836), de l'École d'ingénieurs de Barcelone (1851), de l'École des ingénieurs de Lausanne (1853), de l'Institut polytechnique de Dresde (1851) et d'autres écoles qui repensent leur curriculum, comme l'École royale polytechnique de Copenhague (vers 1850) ou l'École impériale technique de Moscou (vers 1867). Pour l'Italie, dont la structuration des institutions scientifiques coïncide alors avec l'unification politique, la réussite industrielle de l'Allemagne devient alors une référence plus attractive que la France, comme l'illustrent l'Istituto tecnico superiore fondé à Milan en 1863 et la Scuola d'applicazione per gli ingegneri, fondée à Turin en 1859, qui devient Istituto polytecnico en 1906 après la visite des autorités scientifiques italiennes – dont Vito Volterra (1860-1940) – en Allemagne, en Suisse et en Autriche. Le modèle le plus prégnant pour ce nouveau type d'institution est alors l'École polytechnique fédérale de Zürich, fondée en 1855 en systématisant le type d'enseignement mis en place au Polytechnikum de Karlsruhe. À Zürich se trouve explicitement et théorisé un nouveau type de cursus, fondé sur un point de vue pragmatique et regroupant des entités autonomes directement spécialisées [136]. C'est précisément là, à Karlsruhe et à Zürich, dans ces mêmes écoles, que Culmann est appelé à enseigner la statique graphique dont il a élaboré les méthodes pour la construction des ponts.

Dans tous les cas, ces instituts dispensent un enseignement de mathématiques qui n'est pas aussi centré sur l'analyse mathématique que celui de l'École polytechnique en France. Il est donc tout à fait symptomatique que le calcul graphique s'affirme comme discipline dans ce type d'institutions, là où la séparation entre enseignement théorique et applications n'opère pas. Ce sont les besoins des ingénieurs qui orientent et conduisent le développement de ces méthodes et c'est la circulation des connaissances qui guide cet effort de théorisation, unifiant des traditions initialement étanches. Ainsi peut s'éclairer le fait, constaté par K. Chatzis (cf. § 5.1), que la statique graphique a failli naître plusieurs fois en France, notamment sous l'impulsion de Poncelet, mais qu'elle n'est finalement advenue qu'avec les cours de Culmann à Zürich, débouchant sur leur publication en 1866 [27]. Le cas de Culmann et de la sta-

tique graphique n'est d'ailleurs pas isolé : tous les auteurs qui publient dans cette période et installent comme discipline les méthodes du calcul graphique se trouvent dans de telles situations d'interaction entre plusieurs institutions. Dans les années 1870, Cremona développe les idées de Culmann sur la statique graphique au contact de l'université et de la Scuola degli Ingegneri de Rome. Favaro enseigne cette statique graphique à l'université de Padoue. Et Massau développe l'intégration graphique dans ce type de cadre mixte : c'est dans la section des ponts et chaussées qu'il a fait ses études à l'université de Gand, où il va enseigner trente ans. L'originalité de sa méthode, qui cherche à dégager l'intégration graphique de la statique graphique, s'inscrit dans cette orientation du travail de Massau vers les formes de l'analyse mathématique pratiquées dans l'enseignement universitaire.

Cette situation éclaire également les raisons pour lesquelles ce même calcul graphique n'apparaît pas en tant que discipline au pays de la première révolution industrielle, la Grande-Bretagne, où les ingénieurs sont pourtant très présents. L'état de dispersion dont il a déjà été fait mention à propos des journaux et des sociétés d'ingénieurs (cf. § 8.3.2, p. 20) s'enracine de fait sur le mode de formation spécifique des ingénieurs dans ce pays. Il est tout à fait symptomatique qu'il n'existe pas d'institut polytechnique en Angleterre pour la formation des ingénieurs civils et que cette dernière y soit organisée par les employeurs à partir d'un système d'apprentissage. Elle se pratique donc d'abord et avant tout dans les entreprises. Elle ne sera intégrée que tardivement, vers la fin du siècle, dans les nouvelles universités des villes industrielles : les *red-brick universities* ou *civic universities*. Comme l'écrivent Irina Gouzévitch et André Grelon à ce sujet :

Les employeurs utilisent l'apprentissage pour former l'encadrement à tous niveaux, y compris managérial et technique, et les chefs d'entreprise qui en contrôlent le déroulement y sont très attachés. C'est aussi le cas des sociétés professionnelles d'ingénieurs qui complètent cette formation pratique par des conférences plus théoriques ou des débats sur des questions d'actualité, incitant aussi leurs membres novices à présenter des travaux personnels avant d'être titularisés au bout de plusieurs années dans la corporation. Pour pouvoir intégrer ce système, les postulants sont obligés de prendre un parrain qui les suit dans l'entreprise et qu'ils doivent payer. Plus le devenir potentiel est élevé, qu'il s'agisse de formation technique ou managériale dans un bureau ou dans l'atelier, plus la propédeutique est longue et plus le coût de l'opération est élevé. Ce mode de formation propre au Royaume-Uni se poursuivra tout au long du siècle, même si, à partir du dernier tiers du XIX^e siècle, des voix s'élèvent pour réclamer une formation plus formalisée avec un cursus théorique élaboré ([55], p. 289).

Même une institution comme la Royal School of Mines n'est fondée qu'en 1851 – elle fusionnera en 1872 avec la Royal School of Chemistry. Les professeurs d'ingénierie des universités ont d'abord fait leurs armes dans les entreprises, comme c'est le cas de William John Macquorn Rankine (1820-

1872) à Glasgow (1855)¹⁹, ou de Fleeming Jenkin (1833-1885) à Edinburgh (1868). En témoigne également la carrière tout aussi caractéristique de James Thomson, tardivement devenu professeur d'ingénierie civile à Belfast (1857-1872), puis à Glasgow. Quant à Hele Shaw, il s'est particulièrement investi dans le travail d'institutionnalisation de l'enseignement technique dans l'Empire britannique. Il a conduit cette tâche d'abord comme premier professeur d'ingénierie des nouvelles universités (*red-brick universities*) des grandes villes industrielles, de Bristol en 1881, puis de Liverpool en 1885 – où il a fondé des collèges d'ingénierie. Il a poursuivi cette tâche dans l'Empire britannique, à l'Institut technique du Transvaal en 1904, où il occupera la chaire d'ingénierie civile, mécanique et électrique, avant d'être nommé organisateur de l'enseignement technique du Transvaal en 1905 par le secrétaire d'État aux Colonies. À son retour en 1906, il sera ingénieur conseil à Westminster et se consacrera à l'exploitation de ses propres inventions.

Cette spécificité de la formation des ingénieurs en Grande-Bretagne peut être considérée comme raison principale du manque d'harmonisation – ou de normalisation – des méthodes du calcul graphique par rapport au Continent. Dans ses rapports de 1889, 1892, 1893 pour la BAAS, Hele Shaw souligne non seulement l'abondance des interventions de représentations graphiques dans son pays, mais il précise que les points de vue divergent sur l'intérêt qu'il peut y avoir à en généraliser les méthodes, parce qu'elles sont surtout évaluées comme relevant strictement de la pratique : l'interpolation qu'elles autorisent est interprétée comme un moyen pour mettre en évidence graphiquement la continuité supposée d'un phénomène à partir de données statistiques ponctuelles, la loi mathématique correspondante étant inconnue. Il règne alors un grand scepticisme en Grande-Bretagne quant aux potentialités théoriques de ces méthodes, scepticisme qui témoigne de la coupure entre l'ingénierie et le monde académique traditionnel, tel qu'il est représenté par Cambridge et Oxford. La fonction explicite du comité que conduit Hele Shaw est d'ailleurs de proposer une réforme de la formation des ingénieurs qui fasse émerger cette discipline. Il souhaite que cette enquête puisse constituer une expression d'autorité qui contribue à faire advenir un accord sur l'uniformisation des méthodes et de leur enseignement. Comme il l'a écrit en 1893, d'un point de vue quelque peu nationaliste pourtant contesté déjà par Favaro ([43], p. xxx) en 1879 :

The reason for this difference is to be found, not altogether, as it is often supposed, in a want of appreciation on the part of English engineers or professors of graphical statics – for it was in England that the germ of such methods was first developed by Rankine, Maxwell, Jenkin, and others – but because the system of appointing professors in the special polytechnics de-

19. La première chaire royale d'ingénierie civile du Royaume-Uni, attribuée à Lewis Gordon (1815-1876), a été fondée à Glasgow en 1841 par la reine Victoria.

voted to the allied sciences is there in vogue rather than in England, where one or two chairs of engineering are added to other chairs of the university or university college ([71], p. 610).

Moyennant quoi Hele Shaw propose la création d'un cours spécialisé à enseigner parallèlement au cours de géométrie descriptive. Ce qu'il appliquera dans les écoles d'ingénieurs intégrées aux nouvelles universités. Mais il précise aussi que ce qui est enseigné sur le Continent sous la dénomination de statique graphique relève de méthodes générales qui peuvent aussi être enseignées en dehors des applications, susceptibles d'en découler ultérieurement. Il rejoint ainsi le point de vue qui organise les études en France autour de l'École polytechnique et qui conduit pourtant aux mêmes conséquences. Cet écart entre la situation sur le terrain et la solution envisagée témoigne de l'impact idéologique des grandes institutions d'enseignement que sont alors l'École polytechnique en France, Cambridge et Oxford en Grande-Bretagne, impact idéologique qui occulte la réalité des faits. Mais c'est bien dans les pays et les établissements où l'enseignement théorique n'est pas coupé des applications que les méthodes du calcul graphique s'imposent d'abord, et s'imposeront le mieux.

8.3.4. Des méthodes constitutives du savoir des ingénieurs

Les publications synthétiques de Culmann, Cremona, Favaro et Lalanne permettent de dater le moment de la pleine reconnaissance du calcul graphique comme discipline autour de 1870. Elle est essentiellement marquée, outre ces publications, par l'existence d'un enseignement systématique dans les instituts polytechniques ou les écoles techniques supérieures, ce dont fait notamment état Favaro. L'inventaire qu'il en dresse en 1879 donne un bon aperçu de la situation, que Hele Shaw confirme d'ailleurs une quinzaine d'années plus tard : les méthodes graphiques se développent dans le nouveau cadre des instituts fondés sur le modèle de Karlsruhe et Zürich, dans les pays où l'industrialisation continue de se propager et le réseau de communications de s'étendre. À Zürich, Culmann donne un cours spécial obligatoire depuis 1860. En Italie, les cours de statique graphique sont également obligatoires et largement répandus : ils ont été successivement fondés à l'Institut technique supérieur de Milan, à l'École d'application annexée à l'université de Padoue, dans les écoles d'application de Rome, de Naples, de Turin, de Bologne, de Palerme, et enfin dans les universités de Pavie et de Pise. À Berlin, au moment où écrit Favaro, deux cours de statique graphique sont donnés respectivement à la Gewerbeakademie et à la Bauakademie, l'un dans le cadre du cours obligatoire de mécanique, l'autre dans celui d'un cours spécial facultatif. En dehors de ces deux établissements, d'autres cours spéciaux sont donnés en Allemagne, à Aix-la-Chapelle, Karlsruhe, Darm-

stadt, Munich. La statique graphique est enseignée à Dresde, dans le cours de ponts et chemins de fer, ainsi qu'à Hanovre et Stuttgart, dans le cours de mécanique. L'enseignement y est généralement obligatoire, sauf à Munich, où tous les cours sont libres. En Autriche au même moment, elle est professée dans quatre établissements : à Prague, Gratz et Brunn, ainsi qu'à Vienne, où elle est introduite dans les cours obligatoires de mécanique et de construction, et où on a créé de plus un cours facultatif spécial. Cependant, à Vienne et Brunn, elle est exigée seulement des élèves qui prétendent au diplôme, tandis qu'à Prague et Gratz, les cours spéciaux sont obligatoires pour tous les élèves. En Russie, les cours sont également obligatoires depuis plusieurs années à l'École polytechnique de Riga, tandis qu'au Danemark, Hieronymus Georg Zeuthen (1839-1920) donne un cours que suivent les élèves de l'École polytechnique à l'université de Copenhague en 1876-1877.

Au bilan, Favaro affirme que la statique graphique est alors enseignée en Angleterre, en Suisse, en Allemagne, en Russie et dans toutes les écoles d'application italiennes. De plus, elle se propage rapidement dans les universités des États-Unis d'Amérique, et il conclut qu'il y a lieu « de penser qu'elle fera bientôt l'objet de cours spéciaux dans le pays où elle a trouvé ses principales origines : nous voulons parler de la France ». Ce qui fut bien le cas à partir des traductions en français de Culmann et Favaro en 1880. Favaro cite d'ailleurs les traductions françaises de très nombreux ouvrages allemands sur le sujet, publiés par H. Scheffler, W. von Berkhan, W. Matzka, G. Dillner ([43], note p. xix). Cette méthode se répand jusqu'aux États-Unis où un professeur de l'université de Cincinnati, Henry Turner Eddy (1844-1921), publie plusieurs brochures de qualité sur la statique graphique et informe Favaro qu'elle est alors enseignée à l'université du Michigan par Charles Ezra Greene (1842-1903), professeur d'ingénierie civile qui a lui aussi publié plusieurs articles sur le sujet. De fait, presque toutes les écoles d'ingénieurs l'enseignent, bien que Favaro ne puisse préciser exactement jusqu'à quel niveau. Parallèlement, en Belgique à cette même époque, alors que la statique graphique est enseignée à Liège par le professeur Victor Dwelshauvers-Dery (1836-1913), Massau commence à enseigner sa méthode d'intégration graphique à l'université de Gand, qu'il développera pendant une trentaine d'années (1878-1904) avec l'ambition affichée de supplanter la statique graphique.

Dans les années 1890, d'après Hele Shaw, l'enseignement de la statique graphique et des méthodes graphiques de calcul s'est étendu dans les écoles d'ingénieurs d'Allemagne, d'Autriche, d'Italie, d'Espagne, de Russie, de Belgique, de Norvège, de Suède et de Suisse, ainsi que dans la plupart des collèges et des écoles techniques en Amérique. Hele Shaw s'appuie sur une enquête minutieuse, organisée par le sous-secrétaire aux Affaires étrangères, avec la collaboration du consul de Grande-Bretagne à Munich, de Cremona

à Rome, de Dwelshauvers-Dery à Liège et du professeur Ira Osborn Baker (1853-1925), de l'université de l'Illinois. Le rapport de 1889 fournit une bibliographie des ouvrages de référence, non pas, écrit Hele Shaw, ceux qui traitent des méthodes graphiques en général, mais ceux qui permettent de résoudre les problèmes de la science mécanique, regroupant les principales sources continentales et états-uniennes. L'intérêt du comité porte initialement sur les possibles applications de ces méthodes à l'électricité. L'enquête et la bibliographie confirment le caractère dominant de la statique graphique – Hele Shaw la qualifie en 1893 de « seule branche spécialisée de l'application de la construction graphique » – et des méthodes mécaniques d'intégration dans les années 1880. Il écrit d'ailleurs un article très détaillé sur les intégrateurs mécaniques en 1885 [68]. Outre Cremona, Culmann, Eddy, Favaro, Greene, Herrmann, Lévy, Ott, Poncelet, Ritter, le rapport de 1889 recense les ouvrages ou articles d'auteurs moins reconnus comme C. Saviotti (Rome, 1879), J. Schlotke (Hambourg, 1887), J. J. J. Wenck (Berlin, 1879), J. J. Weyrauch (Leipzig, 1874), F. Steiner (Vienne, 1876), F. H. Jenkin (Edinburgh, 1877), R. H. Smith (London, années 1880), H. Bilgram (Philadelphie), A. Jay Du Bois (New York, 1877), J. R. Willett (Chicago, 1888), etc. Hele Shaw signale en outre l'existence d'autres traductions portant sur les cours de statique graphique de Braunschweig, Hanovre, Liège, Saint-Pétersbourg, Milan, Brunn, Madrid, etc., dont les références ont été déposées au bureau de la BAAS.

Quant à la France, si la statique graphique tarde à s'y imposer, les tables graphiques s'y trouvent pourtant abondamment développées et transmises bien avant que d'Ocagne ne fonde la discipline sous le nom de « nomographie ». Indépendamment de toute référence à Culmann et Favaro, Lalanne affirme en 1878 que l'usage des tables graphiques est enseigné à l'École des ponts et chaussées depuis plus de vingt ans à partir de sa géométrie anamorphique (cf. § 8.1) et qu'il existe de nombreuses publications de ce type de tables dans des travaux en anglais et en allemand.

8.3.5. Apogée du calcul graphique et science industrielle

Des années 1880 à la Première Guerre mondiale, le calcul graphique se revendique comme une discipline à part entière et son apogée coïncide avec le rôle devenu incontournable des ingénieurs dans le processus d'industrialisation. Associé aux planimètres et aux intégraphes, le calcul graphique intervient comme le mode de calcul privilégié de l'ingénieur, dont le statut professionnel s'affirme définitivement. À l'occasion de l'exposition universelle de Chicago en 1893, se tient un Congrès international des ingénieurs, où industriels, savants et ingénieurs se rencontrent et consignent leurs discus-

sions²⁰. L'impact de ces méthodes de calcul se manifeste aussi bien dans la généralisation de leur enseignement (cf. § 8.3.4), que dans une abondance de publications de plus en plus synthétiques qui se développent en parallèle et diffusent, soit directement, soit par le biais de traductions, entre l'Europe, les États-Unis, le Canada et la Russie. Il ne s'agit plus de présenter des méthodes nouvelles, mais d'en synthétiser les différents modes d'intervention, pour les mettre au service de développements techniques qui s'accélérent et mobilisent aussi bien les mathématiques que la physique.

L'âge d'or de la statique graphique coïncide avec celui des constructions métalliques, qui soutient aussi bien le processus d'industrialisation que l'appropriation de nouveaux territoires. Les ingénieurs sont engagés dans des constructions d'ouvrages bien au delà des frontières nationales. Ces ouvrages atteignent des dimensionnements nouveaux (ponts, arcs, viaducs, tabliers en treillis) qui nécessitent de nombreux calculs, pour lesquels il s'agit d'optimiser la forme des ouvrages en tenant compte des contraintes auxquelles ils sont soumis sous l'effet des forces mécaniques et de l'action du vent²¹. Les problèmes rencontrés pour assurer la stabilité des ponts et la résistance des membrures dans les systèmes articulés nourrissent donc abondamment les développements concomitants de cette discipline nouvelle. Très tôt, avec la conquête de l'Ouest aux États-Unis, les publications de Eddy ([37], [38]) accompagnent l'installation du chemin de fer. Elles sont immédiatement traduites en allemand [39]. En Grande-Bretagne, comme le souligne Hele Shaw dans les années 1890 (cf. § 8.3.4), la réflexion théorique sur la statique graphique n'a pas fait défaut, elle est même intervenue assez tôt, en relation avec la première révolution industrielle, mais elle provenait d'ingénieurs écossais proches des milieux académiques, qui ont publié soit dans des mémoires, soit à l'intérieur d'ouvrages plus généraux, et non dans des volumes spécialisés. Des méthodes graphiques pour déterminer les contraintes mécaniques dans un système articulé ont ainsi été proposées successivement par l'ingénieur et entrepreneur Jenkin, devenu professeur d'ingénierie à Londres au University College, puis à l'université d'Edinburgh [74] par Rankine, le

20. S'y retrouvent notamment les ingénieurs Ritter et Hele Shaw, les mathématiciens Felix Klein et d'Ocagne. Sous l'impulsion des professeurs d'ingénierie Stillman W. Robinson (1838-1910), de l'université de l'Ohio, et Ira Baker, de l'université de l'Illinois, la question de la formation des ingénieurs est au centre des débats (Division E) et débouche entre autres sur la création de l'ASEE (American Society for Engineering Education).

21. En France, le viaduc de Taude en construction s'est écroulé dans les années 1850. En Angleterre, l'effondrement du Tay Bridge au cours d'une tempête en 1879, moins d'un an après son achèvement, a été déterminant pour le début des travaux de Hele Shaw comme fabricant d'instruments : premier professeur d'ingénierie à Bristol en 1881 après des études acharnées où il travaillait le jour tout en suivant des cours du soir, Hele Shaw présente la même année à la BAAS un anémomètre intégrateur rapidement installé à Liverpool.

théoricien de la machine à vapeur, professeur d'ingénierie civile à l'université de Glasgow, dans son *Manual of Applied Mechanics* ([147], [148]), et par le célèbre physicien Maxwell ([111], [112], [113]) (cf. § 5.2.2). Ces efforts de théorisation sont très vite intégrés par les ingénieurs du Continent recevant une formation mathématique. En Allemagne, aussi bien Christian Otto Mohr (1835-1918) que Heinrich Franz Bernhard Müller-Breslau (1851-1925) intègrent immédiatement les apports de Culmann et de Maxwell, le premier dans son enseignement aux instituts polytechniques de Stuttgart et de Dresde, le second dans ses très abondantes publications. Ses traités de statique graphique deviennent des livres de référence dans toute l'Europe, régulièrement réédités et traduits de 1871 à 1921 ([120], [121], [122], [123], [124]). En particulier, Müller-Breslau est immédiatement traduit en français par Seyrig (cf. § 8.2.3, [122]), l'ex-associé de l'entreprise d'Eiffel, qui construit de très nombreux ouvrages en France et dans le monde entier, en Roumanie, au Pérou, en Bolivie, en Hongrie, en Espagne et au Portugal, ainsi que les ponts d'acier préfabriqués à assembler sur place qu'il exportera sur tous les continents et qui permettront d'établir de nombreuses voies de pénétration pour l'empire colonial français en Afrique et en Indochine, en Cochinchine et au Tonkin. Les publications de Lalanne, Cremona et Favaro, déjà examinées dans ce chapitre pour l'approche historique qu'elles offrent sur les premiers développements de ces méthodes, relèvent de cette période synthétique d'affirmation de la discipline.

Mais la rencontre entre mathématiques et ingénierie n'a pas lieu seulement autour de la formation des ingénieurs. Elle concerne également le monde académique, qui reconnaît progressivement l'importance des « mathématiques appliquées ». Cette reconnaissance est le fait d'une nouvelle génération, soit d'ingénieurs se tournant vers une carrière académique, soit de mathématiciens concernés par les nouveaux développements de la physique. Les méthodes graphiques font alors l'objet, non seulement de synthèses, mais de renouvellements théoriques, notamment avec la mutation des travaux sur les abaques vers la nomographie. Ainsi, le mathématicien Carl Runge, après des études de mathématiques pures à Berlin, s'oriente-t-il vers la spectroscopie astronomique et les méthodes numériques et graphiques. Il sera le premier professeur de mathématiques appliquées à Göttingen en 1904, sur une chaire qui disparaîtra d'ailleurs à sa mort. En 1909-1910, il est invité aux États-Unis, où l'université est plus proche de l'industrie qu'en Allemagne, pour donner à l'université Columbia de New York un cours sur les méthodes graphiques, qui sera publié en anglais en 1912 avant d'être traduit en allemand [151]. Runge donnera également des cours sur les méthodes d'intégration graphique en 1919 pour la Deutsche Gesellschaft für technische Physik à Berlin. En France, les quatre volumes de la 2^e édition de la *Statique graphique* de Maurice Lévy (1838-1910), parus en 1886-1888 [95], constituent

la source de référence pour cette période, citée par Hele Shaw et d'Ocagne. Mais le travail de d'Ocagne est plus représentatif encore, puisqu'il publie sans interruption sur le sujet, de 1884 à 1926 ([127], [128], [129], [130], [131], [132], [133], [115], [134]), une série d'articles et d'ouvrages de plus en plus synthétiques qui renouvellent le champ des méthodes graphiques autour de la nomographie, avant de diffuser dans l'ensemble du monde industrialisé, jusqu'en Russie et outre-Atlantique. Comme Massau, dont il intègre les travaux, d'Ocagne établit le calcul graphique sur des principes autonomes et propose à son tour, comme Favaro avant lui, une organisation rationnellement ordonnée des méthodes alors connues, selon le type de problèmes qu'elles sont susceptibles de résoudre. Croisant nomographie et géométrie projective, il intègre le système de coordonnées de Plücker pour transformer, par dualité, les abaques à droites concourantes de Lalanne en nomogrammes à points alignés. Ces nouveaux nomogrammes donnent des épures plus simples, donc une lecture plus directe, et ils concentrent davantage encore de données. Ce sont là des qualités spécifiques qui vont contribuer à leur succès et à leur pérennité²². D'Ocagne enseigne le calcul graphique à l'École polytechnique, dans les mêmes années où Cholesky donne par correspondance – au moins pendant la période 1909-1914 – son *Cours de calcul graphique*²³ à l'École spéciale des travaux publics, du bâtiment et de l'industrie (cf. § 8.1). La nomographie va connaître des développements considérables, notamment autour de l'aéronautique naissante, avec les travaux de Rodolphe Soreau (1870-1935), polytechnicien et ingénieur des chemins de fer, qui se tourne très tôt vers l'aviation ([158], [159]). Il sera le premier président de la Fédération aéronautique française. La nomographie continue d'accompagner les développements des chemins de fer, ainsi en Égypte où en 1922, l'Académie des sciences de Paris attribue le prix Montyon à Farid Boulad (1872-1947), ingénieur des chemins de fer d'État égyptiens, pour ses travaux sur la nomographie et la géométrie. Aux États-Unis, dans les années 1920, la nomographie s'introduit dans les milieux médicaux avec les travaux du physiologiste Lawrence Joseph Henderson (1878-1942), qui avait rencontré d'Ocagne lors d'un séjour en France en 1921-1922 ([60], p. 75).

La Grande-Bretagne suivra à l'évidence un itinéraire décalé par rapport au développement du calcul graphique ([142], p. 230-249). Les travaux du comité de la BAAS des années 1890, présidé par Hele Shaw, ne parviendront pas à en imposer les méthodes dans les formations d'ingénieurs, pas

22. Les nomogrammes à points alignés sont toujours utilisés aujourd'hui, par exemple en photographie, où le nomogramme de Samuelson (1974) fournit le filtre nécessaire à la conversion d'une lumière source.

23. C. Brezinski et D. Tournès ([178]; [15], chap. 7) ont récemment édité et analysé le manuscrit de ce cours retrouvé dans les archives de l'École polytechnique, où il avait été déposé par les descendants de Cholesky.

plus que les efforts de Karl Pearson (1857-1936), professeur de mathématiques appliquées, pour l'installer à l'université de Londres²⁴, tant les débats seront conflictuels quant à la nature et aux formes que doit instituer l'enseignement des mathématiques, à l'université tout comme dans les écoles spécialisées. Pearson implantera pourtant les méthodes du calcul graphique dans ses travaux de statistiques, où il met en avant la visualisation qu'offrent les courbes pour dégager des propriétés de l'évolution biologique. Dans ces mêmes années 1880, la Grande-Bretagne adopte cependant une voie spécifique, significative de la proximité intellectuelle et professionnelle entre physiciens et industriels : celle de la mécanisation des méthodes graphiques (cf. § 8.2.4). Planimètres et intégraphes, nés sur le Continent et dont la fabrication s'intensifie dans cette même période (cf. chap. 6), font l'objet de rapports, à la fois pour The Institution of Civil Engineers, créée en 1818 pour structurer le monde des ingénieurs britanniques, et pour la BAAS, créée en 1831 afin d'installer des relations d'échanges entre le monde industriel et le monde académique. Après le rapport général de Charles Watkins Merrifield (1827-1884) sur l'intégration mécanique en 1880 [116], rapport qui insiste sur la nouveauté de l'intégrateur de Thomson et sur l'importance de l'intégration des équations différentielles, Henrici fait le point sur les planimètres en 1894 [72]. Hele Shaw, lui aussi inventeur de tels instruments, donne une présentation très détaillée des intégrateurs mécaniques en 1885 [68], tandis que Charles Vernon Boys (1855-1944) présente ses propres intégraphes en 1881 devant la Physical Society ([13], [14]), indépendamment de ceux qu'Abdank-Abakanowicz développe en France au même moment ([1], [33]). Mais les développements du calcul graphique et de la mécanisation de ces méthodes ne sont pas indépendants, puisque les observations issues de l'installation des marégraphes en France, notamment à Marseille, serviront au polytechnicien Charles Lallemand, géophysicien et inspecteur général des Mines, à mener à bien sa vaste entreprise du nivellement de la France, pour laquelle il développe la méthode des abaques hexagonaux. Cette méthode va lui permettre de tripler la précision des calculs et de réduire considérablement le prix de revient de l'ensemble de l'entreprise ([89], [90], [91], [92]).

Des disparités perdureront quant à la façon dont ces cours et ces méthodes sont intégrés dans l'enseignement. Les cours sont tantôt obligatoires, tantôt facultatifs. Et surtout, tantôt ils sont affichés comme des cours spéciaux de statique graphique, tantôt ils sont dispensés dans le cadre d'un autre cours, souvent celui de géométrie descriptive – ce qui est notamment le cas en Angleterre, comme le souligne Hele Shaw. Ces disparités ne sauraient être négligées, car au delà des différences d'ordre institutionnel dont elles peuvent dépendre, elles sont également très significatives des différentes conceptions

24. À partir des mêmes critères pédagogiques que Favaro.

qui s'affrontent, tant autour des méthodes du calcul graphique que de la nature des mathématiques en général, dont les conceptions balancent alors entre analyse et géométrie.

8.4. Légitimations du calcul graphique

À partir des années 1880, les publications changent en quelque sorte de nature. Elles ne sont plus seulement destinées à l'enseignement. S'y ajoute une dimension supplémentaire : l'affirmation du calcul graphique en tant que discipline. Ce souci de légitimation concerne d'abord les écrits issus des instituts polytechniques, qui attestent de l'importance du savoir issu de leurs pratiques. Mais il concerne aussi les institutions qui reçoivent ces méthodes de seconde main et qui ont besoin d'arguments pour convaincre leurs condisciples de leur importance. Leur défiance témoigne de l'existence de quelque résistance, étayée par d'autres approches du calcul qui leur font barrage. Plusieurs types d'argumentation légitimante sont alors mobilisés, qui correspondent à ces différentes situations.

8.4.1. Les qualités propres à l'ingénieur

Le développement des méthodes du calcul graphique et graphomécanique entend répondre aux besoins des ingénieurs, qui se diversifient au XIX^e siècle, pour concerner de nombreux secteurs civils à la fin du siècle. Dans les écrits qui enseignent ou popularisent ces méthodes s'affirment en premier lieu les critères de leur adéquation aux exigences du métier et de la « science de l'ingénieur » ([133], p. xii).

Le premier de ces critères concerne le niveau de précision requis pour le résultat. Celui-ci n'a pas nécessairement à être exact au sens mathématique du terme, dès lors que l'approximation obtenue suffit aux besoins du calcul. Ainsi, d'Ocagne et Torres Quevedo analysent en détail les conditions auxquelles doit satisfaire un nomogramme pour donner un résultat exact et en quoi l'approximation est suffisante dans les cas où le résultat ne peut être qu'approché ([133], p. xiv-xvi ; [175]). La question est d'autant plus pertinente que, dans bon nombre de situations concrètes, le calcul graphique ou graphomécanique traite de données fournies par l'expérience – ce qui conduit Lalanne à parler de « lois empiriques » – dont n'est alors connue qu'une mesure approchée de la valeur exacte. Il n'empêche que le degré d'approximation doit être garanti par le calcul, ce dont s'assure notamment Massau en se livrant à un calcul d'erreur pour sa méthode d'intégration graphique ([177], p. 198-199). L'habileté du dessinateur pour le tracé des épures, ainsi que de l'utilisateur pour la lecture des interpolations, intervient elle aussi dans la précision du résultat. La méthode d'intégration graphique

de Massau est particulièrement exigeante sur ce point, puisqu'elle impose de restituer à main levée la continuité du tracé entre deux points connus avec une pente donnée. C'est pourquoi Hele Shaw estime que cette pratique ne va pas de soi et que les utilisateurs doivent être formés à ces modes de tracé, ainsi d'ailleurs qu'à l'interprétation des constructions graphiques. Lalanne résume ainsi en 1878 ce que bon nombre d'auteurs ne manqueront jamais de rappeler : « Dans le système des tables de 1843, il résulte de l'expérience de M. Ricour que deux minutes suffisent pour lire les trois nombres cherchés : aire, emprise et talus, et que l'erreur commise dépasse rarement 1% » ([88], 2^e éd., p. 19).

Rapidité, efficacité, simplicité sont donc les maîtres mots du travail de l'ingénieur, en particulier sur le terrain. Ces critères sont primordiaux pour des raisons techniques aussi bien qu'économiques. Ils le sont également pour surmonter des situations de danger, comme ce sera le cas de certaines applications de ce calcul pendant les guerres : marins en détresse, artilleurs face à l'ennemi [159]. Dans tous les grands travaux concernés, de grandes quantités de calculs sont nécessaires, souvent pour la même procédure, et des sommes d'argent considérables sont engagées. Cette efficacité du calcul graphique est valorisée face à la lourdeur et à la complication des méthodes analytiques, par exemple par Eiffel en 1889 dans un mémoire où il fait le bilan de la construction du viaduc de Garabit :

[...] j'ai reconnu que les constructions graphiques ont pour elles la rapidité, tout en faisant ressortir mieux que les calculs analytiques la variation des efforts et l'influence des charges défavorables. [...] une exactitude exagérée, à laquelle on ne peut atteindre qu'au moyen de calculs très longs et laborieux, n'est pas nécessaire là où les éléments mêmes du calcul, l'intensité du vent, son action sur les différentes formes de pièces qu'il rencontre, présentent une grande incertitude. [...] [Quant aux calculs analytiques utilisés par les experts pour contrôler le projet], il m'a paru que l'ensemble de ces calculs présentait une complication notablement plus grande que ceux du présent mémoire ([40], p. 11-14).

Dans le cadre du système de production des savoirs de l'ingénieur, les méthodes du calcul graphique et graphomécanique obéissent aux exigences de la division du travail. La conception et la réalisation des abaques, comme celles des instruments, sont intrinsèquement séparées de leur utilisation. La conception est celle des méthodes, elle s'appuie sur les mathématiques, est enseignée dans les traités et mise en œuvre dans le bureau d'études. La réalisation des tables et des graphiques, fastidieuse lorsqu'elle est effectuée au cas par cas, est désormais réalisée une fois pour toutes, imprimée sur papier ou gravée sur plaque – aujourd'hui encore sur feuille de plastique. La fabrication des instruments s'accomplit à l'atelier ou à l'usine. La lecture et l'interprétation des tables et des graphiques ont lieu sur le terrain. Là où ces usages mobilisent un personnel de plus en plus nombreux, cette

organisation systématique des procédés de calcul permet de réaliser des économies substantielles, aussi bien dans la pratique que dans la formation des personnels, séparés entre ingénieurs et techniciens. Cholesky résume ainsi l'ensemble des intérêts dont est porteur le calcul graphique par rapport aux tables numériques, juste avant la Première Guerre mondiale ([15], p. 245) :

Le calcul graphique a pour objet de remplacer les calculs numériques par un dessin, une sorte d'épure, dont la construction permet de passer directement des données au résultat. L'épure employée est généralement désignée sous le nom d'Abaque. L'exécution d'une telle épure est souvent compliquée et demande d'autant plus de soin que l'on désire une précision plus grande. Aussi n'a-t-on pas en général intérêt à chercher à résoudre graphiquement un cas isolé, pour lequel la construction du graphique demanderait le plus souvent beaucoup plus de temps que le calcul numérique.

Au contraire, les procédés du calcul graphique deviennent très avantageux lorsqu'il s'agit d'un calcul qui se reproduit très fréquemment, de l'application d'une formule dans laquelle les données seules varient. Le dessin peut alors être disposé de façon à fournir à l'aide d'opérations simples les résultats correspondants à tous les systèmes de valeurs des variables. L'établissement de l'épure peut dans ce cas être très long, il n'en résulte pas moins une économie de temps très sensible, si chaque fois qu'on s'en sert pour une opération très fréquente, on gagne une partie notable de la durée du calcul numérique qui se trouve ainsi supprimé.

Le calcul graphique s'applique donc principalement à des calculs qui doivent être répétés très fréquemment.

Il est inutile d'insister sur l'intérêt que présente toute réduction dans la durée des calculs, cette réduction se traduisant toujours par une économie de temps et par suite d'argent.

Cette division du travail s'inscrit ainsi dans un processus d'élargissement hiérarchisé des savoirs, dans lequel les techniciens acquièrent les connaissances propres à l'utilisation de ces méthodes sans avoir à maîtriser les savoirs théoriques qui les fondent. L'interprétation des abaques et la lecture des résultats instrumentaux demandent une moindre concentration mentale que les calculs numériques issus de l'analyse mathématique [115]. Elles n'exigent pas même la maîtrise de l'écrit. Elles sont donc à la portée d'utilisateurs n'ayant pas suivi d'études supérieures. Jules Andrade (1857-1933), professeur à l'université de Besançon et chargé d'un enseignement du calcul graphique à des techniciens dans une école d'horlogerie, indique à ce propos en 1904, dans une communication au Congrès international des mathématiciens de Heidelberg ([5], p. 625) :

[...] il est encore d'autres notions que l'image géométrique rend accessibles à des étudiants artisans; telles sont les méthodes d'approximations successives et avec elles la belle méthode d'intégration par quadratures répétées en séries, que l'on doit à M. Picard, – ces méthodes, dis-je, convenablement interprétées et surtout utilisées sont facilement assimilables. [...] On peut donc nettement affirmer que la notion des infiniment petits n'offre aucune difficulté capable d'arrêter nos artisans toutes les fois qu'elle est ap-

pliée à des variables déjà intéressantes pour eux. Mais, en revanche, tout calcul littéral abstrait les arrête.

Le calcul graphique s'appuie sur des constructions géométriques et sur des manipulations effectuées sur ces constructions. Les qualités mises en avant dans la littérature concernant cette discipline nouvelle, essentiellement constructive et visuelle, sont affirmées comme propres à l'ingénieur. Favaro, en 1879, souligne la spécificité du « langage de l'ingénieur » et les interactions fructueuses qui se jouent entre théorie et pratique dans l'exercice du calcul graphique ([43], p. xviii) :

LE DESSIN EST LE LANGAGE DE L'INGÉNIEUR²⁵. Il traduit sa pensée avec une clarté que le langage ordinaire ne comporterait pas. L'ingénieur dessine d'abord tout ce qu'il se propose de faire exécuter. Il fixe et conserve ainsi la forme sensible de ses idées, le résultat de ses calculs et jusqu'à la trace utile de ses tâtonnements. Il n'attend pas d'ailleurs que ses calculs soient achevés pour en commencer la traduction graphique. Les deux opérations marchent ordinairement de front, et c'est souvent au cours même de l'exécution du dessin qu'apparaît la nécessité de déterminer par le calcul les dimensions de certains organes. Il s'en faut, d'ailleurs, que l'utilité du dessin se borne à l'enregistrement passif des résultats calculés, et il n'est pas rare que l'épure fournisse directement des données pour le calcul, ou même des résultats susceptibles d'une application immédiate.

Porté par des dessins et des constructions, le calcul graphique s'affirme comme fondé sur l'intuition et le sensible, qualités qui s'opposent à l'abstraction propre à la maîtrise des méthodes de l'analyse en général et du calcul infinitésimal en particulier. Du point de vue des ingénieurs qui développent ces méthodes, il n'est pas ici question d'entériner une quelconque infériorité de leur statut par rapport à celui des mathématiciens ou des académiciens. Certains d'entre eux font d'ailleurs partie des ingénieurs savants, membres d'Académies des sciences, le plus souvent dans la section de mécanique²⁶.

L'intuition et le sensible sont au contraire revendiqués comme des qualités spécifiques, assimilées intellectuellement à celles du géomètre, qui travaille lui aussi en s'appuyant sur des constructions. Le géomètre dont il est ici question

25. Souligné par Favaro.

26. Ainsi par exemple, l'ingénieur militaire Arthur-Jules Morin (cf. § 8.2.4), élu membre de l'Académie des sciences en 1843, a développé ses travaux sur les dynamomètres et la mesure du rendement des machines en étroite relation avec cette Académie. Reconnu comme expert en hydraulique (1828-1846), il a mené de nombreuses recherches expérimentales en balistique – sur la résistance des différents milieux à la pénétration des projectiles – ainsi que sur le rendement des machines, et sur les problèmes de chauffage et de ventilation des locaux. Les résultats de ses expériences en matière de frottement, célébrées dans le monde entier, seront présents dans les mémentos d'ingénieurs jusqu'au milieu du xx^e siècle. Il reçut le prix Montyon de mécanique en 1836 pour sa description détaillée du dynamomètre et du chronomètre à style. On peut citer également Lalanne, qui présente sa géométrie anamorphique à l'Académie des sciences en 1843 – Cauchy est alors l'un des rapporteurs –, et d'Ocagne, qui en sera élu membre en 1922.

n'est pas le géomètre avant tout fidèle au caractère déductif de la géométrie d'Euclide. La littérature se réfère systématiquement à la géométrie comme science nouvelle, telle qu'elle a été revivifiée par la géométrie descriptive de Monge et par la géométrie projective établie par Poncelet, Jakob Steiner (1796-1863) et Staudt.

8.4.2. Le calcul graphique et les nouvelles géométries : fécondations mutuelles

La montée en puissance de la profession d'ingénieur s'accompagne d'un changement de son statut. L'ingénieur revendique le statut scientifique de son travail, sans oublier ni ses spécificités, ni ses liens avec l'industrie, c'est-à-dire avec les finalités de son travail. Si la science de l'ingénieur, enracinée dans la mécanique rationnelle depuis le XVIII^e siècle, est d'abord marquée par les développements de la mécanique analytique, elle s'oriente au XIX^e siècle vers les formes plus diversifiées de la science industrielle. Les qualités professionnelles qu'elle met en avant croisent certaines des caractéristiques majeures des nouvelles géométries, parmi lesquelles la géométrie descriptive de Monge et la géométrie projective initiée par Poncelet, qui vont enrichir considérablement les contenus des premiers travaux du calcul graphique, issus des nécessités du terrain. Cette rencontre entre le calcul graphique et les nouvelles orientations de la géométrie engage un processus de fécondation et de légitimation mutuelles, qui va contribuer à son tour au renforcement de cette géométrie restructurée, face aux méthodes analytiques.

Dans cette période de fécondation, les nouvelles géométries vont apporter un soutien tout à fait remarquable comme légitimation du calcul graphique. Favaro fait ainsi coïncider l'enseignement de ces géométries et la naissance de la statique graphique lorsqu'il écrit : « La méthode de Culmann est adoptée dans presque tous les instituts où l'enseignement de la science nouvelle a été introduit » ([43], p. ix).

Cette fécondation est réciproque, au sens où l'importance que prend socialement le calcul graphique dans la culture de l'ingénieur sert en retour de point d'appui aux nouvelles géométries, qui peuvent se revendiquer en tant qu'alternative aux méthodes analytiques. Cette alternative est affirmée comme telle, d'abord parce que le calcul graphique fournit des solutions approchées même lorsque les constructions à la règle et au compas ne fournissent pas de constructions exactes²⁷. Elle est également affirmée pour des raisons pratiques, puisque les méthodes graphiques évitent les calculs fastidieux et répétitifs par lesquels passent les méthodes analytiques, comme le précise Favaro, dès lors que la précision exigée par la situation ne dépasse pas le millième.

27. Mascheroni, *Geometria del compasso*, 1797, cité par [43], p. xiv.

Favaro, universitaire lui-même, s'inscrit directement dans ce contexte où la géométrie nouvelle le dispute en importance à l'analyse : « *L'Analyse* et la *Géométrie* se partagent le champ des Mathématiques, et de tout temps la question des mérites respectifs de ces deux sciences a donné lieu à de sérieuses controverses » ([43], p. v). Dans ce débat, il se situe radicalement du côté de la géométrie, déclarant haut et fort que « de nos jours, la Géométrie a [...] gagné la préférence des hommes voués à la culture des mathématiques » (*ibid.*). Les qualités reconnues comme spécifiques à l'ingénieur sont mobilisées pour critiquer l'analyse et valoriser la géométrie. Intuition et sensibilité permettent d'aborder le réel selon une approche plus directe, plus naturelle, qui sied mieux aux pratiques de l'ingénieur. Elles relèvent d'un type de formation plus proche de la géométrie et de la mécanique, là où l'analyse exige une formation intellectuelle d'emblée plus théorique :

[...] la perfection même [de l'Analyse] comme moyen de recherche nuit à son efficacité comme instrument de culture intellectuelle. Conduit au résultat par des procédés en quelque sorte mécaniques, l'esprit ne tarde pas à perdre de vue les grandeurs sur lesquelles il opère ; il s'avance à travers un labyrinthe de formules, préoccupé de ne jamais abandonner le fil conducteur, forcé d'être plus confiant à mesure que les ténèbres se font plus profondes, et presque toujours inconscient du chemin qu'il vient de parcourir. D'autre part, suivant l'observation très juste de Poinsot, il n'est pas rare que les résultats auxquels l'Analyse conduit restent cachés sous la généralité des symboles algébriques, au point d'apparaître avec moins de clarté dans la solution que dans l'énoncé même.

La Géométrie procède tout autrement. Elle présente les propositions sous une forme sensible ; elle écarte le cortège des auxiliaires qui les déroberaient à notre vue : elle met en évidence la suite des transformations de chaque problème ; et quand apparaît la solution, nos regards surpris admirent la vérité cherchée sous sa forme la plus attrayante et la plus simple ([43], p. v-vi).

Ainsi, le caractère abstrait de l'analyse et des symboles algébriques, qui apparaissait au début du XIX^e siècle comme un gage de généralité et de certitude – voire d'inventivité – pour les mathématiques tout entières, bascule du côté d'une perfection qui ne fait pas bon ménage avec les qualités requises pour affronter la réalité telle qu'elle est. La pratique de l'ingénieur est ici plus proche des nécessités de la modélisation que de celles de la vérité.

Depuis les travaux de Monge et de Poncelet, la nouvelle géométrie a basculé à son tour du côté de la généralité et de l'inventivité. Et sa généralité est telle que cette géométrie renouvelée, que Favaro appelle « moderne », relève pour lui de la géométrie « pure ». Un déplacement de la signification du calcul graphique se produit ainsi : parti de l'empirisme et des pratiques de l'ingénieur sur le terrain, il peut prétendre désormais à la pureté de ses fondements théoriques et, ce faisant, à la généralité de ses méthodes. Pureté

et généralité sont les attributs de la « science vraie ». L'ingénieur tient ainsi les deux bouts du processus de modélisation.

À ce stade de la légitimation, Favaro prône un enseignement des méthodes graphiques qui soit donc pleinement ancré sur un enseignement de la géométrie moderne. Comme Chasles, il refuse que ne soient présentés que « des lambeaux de théories qui ont pour objet suprême et immédiat des applications pratiques » ([43], p. xxxi). C'est là le prix à payer pour l'intégration de ces méthodes au savoir universitaire, au moment où l'enseignement de la géométrie projective vient d'être introduit dans toutes les facultés des sciences d'Italie : « Séparer la Statique graphique de ses origines rationnelles les plus élevées, ce serait fermer toute voie de progrès à cette nouvelle branche des sciences appliquées et méconnaître les principes essentiels de l'enseignement supérieur » ([43], p. xxxi).

Favaro retrace alors les grandes étapes du développement de ces géométries, de Monge, Carnot et Poncelet à Chasles, Steiner [161] et Staudt [160]. « La Géométrie de [ce dernier] est précisément celle que Culmann suppose connue de ses lecteurs » ([43], p. xviii) même si, pour l'enseignement, il lui préfère cependant la présentation qu'en donne Theodor Reye (1838-1919), qui a su la mettre à la portée des ingénieurs en réintroduisant les figures [149]. Favaro partage avec Hermann Hankel (1839-1873) ([58], [59]) la plus haute estime pour la synthèse philosophique réalisée par Staudt, affirmant avec lui que cette géométrie moderne « a concilié les avantages de l'antique synthèse avec ceux de la méthode ». Il le cite pour s'associer pleinement à sa conception devenue classique de la production mathématique :

Une telle tentative n'était possible qu'en Allemagne, pays des méthodes scolastiques et, nous pouvons ajouter, de la pédanterie scientifique. [...] Replié en lui-même, dans sa paisible retraite d'Erlangen, von Staudt a bien pu développer un système scientifique, pour sa propre satisfaction et pour celle d'un ou deux auditeurs qui venaient s'asseoir, par aventure, à côté de sa table de travail : mais la création d'un tel système n'aurait pas été possible à Paris, au contact des autres savants et des auditoires nombreux ([59], p. 30-31).

L'emphase avec laquelle il s'exprime à ce moment précis – parlant alors de « voie royale », de « lien organique », d'« idéal de la science » – témoigne des enjeux : la rivalité entre analyse et géométrie pour représenter les fondements des mathématiques dans les programmes d'enseignement de ces nouveaux centres de formation intégrés aux universités, comme c'est le cas à Padoue où il enseigne.

En tous cas, ces méthodes, et la nomographie en particulier, ont acquis suffisamment d'importance aux yeux des mathématiciens pour qu'en 1900, David Hilbert (1862-1943) formule son treizième problème²⁸ en termes no-

28. Les questions soulevées par ce problème restent très vivantes aujourd'hui, car elles concernent la représentation fonctionnelle.

mographiques (cf. § 4.3.1). Quoiqu'il en soit, l'acuité des débats cherchant à attribuer la « nature » des mathématiques tantôt à l'analyse, tantôt à la géométrie, fournit une piste supplémentaire permettant de comprendre pourquoi l'histoire du calcul graphique est à présent passée sous silence : elle se réfère à des formes de pensée géométriques qui se trouvent marginalisées du fait de l'orientation résolument opératoire, algébrique, des mathématiques telles qu'elles sont enseignées aujourd'hui, où même la géométrie est traitée algébriquement.

8.4.3. Historicisation du calcul graphique

La légitimation du calcul graphique ne se limite pas au cas des nouvelles géométries. Favaro entreprend une très longue généalogie du calcul graphique, dans laquelle il intègre tous les travaux qui ont cherché à représenter les grandeurs par des éléments géométriques, essentiellement des longueurs. Déjà historien des mathématiques, Favaro remonte ainsi à l'arithmétique des Pythagoriciens, aux *Éléments* et aux *Données* d'Euclide, où, écrit-il, « il est fait usage des droites comme symboles ». Il retrace ainsi un « développement continu des méthodes graphiques », enraciné dans la plus haute Antiquité et allant des nombreuses solutions graphomécaniques transmises depuis les Grecs – notamment pour la duplication du cube et la trisection de l'angle – jusqu'aux auteurs hindous Brahmagupta et Bhāscara, et aux nombreux auteurs arabes mobilisés par la résolution des équations cubiques : Mohammed-ben-Moussa, Aboul Wefa, Aboul Djoud, Almahani, Alqouhi, Alhazen et Omar Alkhâyyâm²⁹.

Selon Favaro, les méthodes deviennent florissantes chez les auteurs italiens Leonardo Pisano et Luca Pacioli après « la décadence des Arabes », où elles s'enrichissent de l'analyse géométrique de Tartaglia et de Cardano, avant de retenir l'attention de Viète, mais surtout de Descartes et Newton. Les développements ultérieurs qu'il indique sont ceux qui conduisent à la géométrie de position, depuis Desargues et Pascal jusqu'à l'introduction du calcul infinitésimal en mécanique, mais aussi aux travaux plus directement en relation avec les méthodes graphiques : le *Traité de gnomonique* de La Hire en 1682, la *Géométrie descriptive* de Monge en 1788, jusqu'à « d'innombrables exemples de déterminations et de représentations graphiques appliqués aux opérations du calcul numérique » ([43], p. xix-xx).

Cette présentation par Favaro d'un développement continu des méthodes graphiques pose crucialement la question de l'écriture de l'histoire des mathématiques, et du calcul graphique en particulier. Cette histoire linéaire qu'écrit Favaro s'inscrit directement dans un processus de légitimation du calcul graphique, à la recherche d'origines lointaines qui l'inscrivent dans

29. La transcription des noms indiens et arabes utilisée par Favaro est ici conservée.

une histoire à long terme. Ce processus est fréquent et marque la plupart des approches rétrohistoriques des sciences, dont l'histoire de l'informatique est un des plus récents avatars. Mais cette histoire manque de pertinence, dans la mesure même où elle oublie les conditions de production de cette discipline nouvelle, dont le présent volume cherche à reconstituer l'impact dans toutes ses implications. Ne prenant pas en compte les enjeux et les recompositions disciplinaires qui ont accompagné la cristallisation des méthodes du calcul graphique, elle ne permet pas non plus de comprendre la quasi complète disparition du calcul graphique de l'historiographie contemporaine. De fait, qu'il existe une activité de résolution de problèmes à partir de représentations graphiques ne suffit ni à affirmer l'existence de cette discipline tout au long de l'histoire, ni à augurer de son émergence. Ces activités ne peuvent apparaître comme « préhistoire » du calcul graphique qu'une fois cette discipline constituée, et elles s'en distinguent autant au niveau des méthodes que des finalités. Les méthodes graphiques antérieures appartiennent à d'autres contextes que celui du travail des ingénieurs ; leurs enjeux sont bien différents de ceux qui s'expriment au XIX^e siècle.

La distinction la plus essentielle à respecter entre les constructions géométriques qui ponctuent l'histoire des mathématiques et le calcul graphique tel qu'il s'établit au XIX^e siècle concerne le rôle de ces constructions face à la représentation des « grandeurs ». Dans les *Éléments* d'Euclide, dont le texte demeure d'une importance théorique canonique jusqu'au début du XIX^e siècle, la représentation analytique des grandeurs n'est pas constituée comme telle, et elle ne le sera théoriquement pas avant que ne soit établie la bijection entre « l'ensemble des grandeurs » et les points d'une droite, suite aux travaux de Cauchy, Weierstrass et Cantor. Outre cette limitation conceptuelle, la géométrie des Grecs rejette hors des mathématiques, et du côté de la mécanique, toute grandeur qui ne serait pas construite à la règle et au compas. L'activité dans laquelle s'insèrent les méthodes de construction géométrique avant la naissance du calcul graphique a donc une signification bien différente de celle qu'elle aura au XIX^e siècle. Ainsi, les méthodes graphiques auxquelles se réfère Favaro à propos de la duplication du cube ou de la trisection de l'angle ne visent pas à proposer une représentation approchée d'une grandeur connue analytiquement, qui serait trop longue ou trop fastidieuse à établir par le calcul numérique. Dans les mathématiques grecques, les constructions géométrico-mécaniques sont abondantes, d'Archimède à Héron, mais elles échappent à l'édifice théorique des mathématiques euclidiennes (cf. chap. 1, [79]). Elles fournissent une représentation géométrique de grandeurs pour lesquelles n'existe aucun autre mode de symbolisation arithmético-algébrique et qui, par conséquent, échappent à l'appréhension déductive du cadre théorique euclidien, dont elles constituent d'emblée un dépassement. Il ne faut donc pas confondre construction géométrique et

calcul graphique. Leur statut est différent. Si les auteurs qui cherchent à faire l'histoire du calcul graphique les confondent, c'est en éclipsant totalement ce qui constitue alors leurs significations respectives.

De même, dans le contexte de l'astronomie, si l'astrolabe produit par les savants arabes est porteur d'un réseau de courbes cotées à partir de coordonnées, ces courbes ne sont pas lues en termes de fonctions, comme dans les méthodes graphiques, puisque la notion même de fonction n'est pas encore dégagée. Il s'agit plutôt de représentations de trajectoires effectives ou d'auxiliaires de calcul. Les considérer comme des nomogrammes suppose d'oublier le contexte dans lequel sont conçus les traités arabes d'astronomie du xiv^e siècle, relatifs à des constructions de cadrans solaires. Certes, l'historien peut aujourd'hui repérer de subtiles constructions géométriques qui interviennent dans la réalisation et l'utilisation d'instruments très élaborés (cf. chap. 2), mais elles ne forment pas un corpus identifié comme tel par leurs auteurs.

Plutôt que d'attribuer à la *Géométrie* (1637) de Descartes la paternité du calcul par le trait, n'est-il pas plus essentiel à notre propos d'insister sur l'importance de la nouvelle classification qu'il établit entre courbes mathématiques et courbes mécaniques. Descartes déplace ainsi fondamentalement la frontière antérieurement fixée par la géométrie euclidienne, qui n'acceptait comme mathématiques que les courbes constructibles à la règle et au compas. Jouant de toutes les possibilités offertes par la récente symbolisation de l'algèbre, sa *Géométrie* accepte comme mathématiques toutes les courbes susceptibles d'une représentation algébrique polynomiale. L'ambition de Descartes n'est donc pas d'établir des méthodes graphiques de résolution, mais des correspondances entre constructions géométriques et algèbre, dont il va faire un outil privilégié pour résoudre les problèmes de géométrie. L'historien des mathématiques Carl B. Boyer (1906-1976) est tout à fait respectueux de sa démarche lorsqu'il retrace l'historique des solutions graphiques des équations polynomiales [12], mais son analyse conserve malgré tout quelques accents d'une approche rétrospective qui lui font regretter que Descartes n'ait pas exploré toutes les possibilités des méthodes graphiques et qu'il ait fallu attendre le $xviii^e$ siècle pour voir se développer pleinement ce champ de recherche !

La recherche de représentations graphiques existe cependant au moins depuis les travaux de l'école des Mertoniens à Oxford et de l'école de Paris, en particulier dans ceux de Nicole Oresme (1323-1382), bien que ces historiographies du calcul graphique du xix^e siècle finissant n'en parlent pas. Certaines grandeurs y sont représentées par des longueurs selon des directions orthogonales, ce qui permet de visualiser une correspondance entre leurs valeurs numériques et de calculer graphiquement certains résultats pour lesquels n'existe aucune formule, comme l'espace parcouru en un temps

donné dans un mouvement uniformément difforme. Depuis la Renaissance, et sur les traces d'Archimède, les courbes construites sont souvent repérées par rapport à un axe de symétrie, considéré comme axe des abscisses, les points de la courbe étant alors « ordonnés » à partir de ces abscisses. Naissance de l'algèbre et quantification des mathématiques généralisent ainsi l'association entre le repérage des quantités et de leurs variations continues, d'une part, et les points d'une droite, d'autre part, bien avant les travaux théoriques validant cette correspondance. À partir de la naissance de l'analyse algébrique et de la symbolisation algébrique des grandeurs, des constructions géométriques sont donc indéniablement utilisées pour obtenir des résultats plus directement que les méthodes de l'analyse algébrique. C'est notamment le cas pour la résolution numérique des équations. Dans ce domaine en effet, il n'existe pas de formules générales de résolution par radicaux connues au delà du degré 4 – même si les mathématiciens en poursuivent assidûment la recherche jusqu'aux travaux de Galois – et les quelques formules connues donnent d'ailleurs des calculs très compliqués. Les méthodes graphiques longuement explorées par Newton dans ses manuscrits s'inscrivent dans cette perspective (cf. chap. 3). Elles sont envisagées comme des outils, au même titre que d'autres pratiques instrumentales ou calculatoires, dans des résolutions d'équations nécessitant l'approximation d'une racine.

Ces démarches constructives montrent que la théorie de la construction des équations par tracé et intersection de courbes, qui fleurit entre 1637 et 1750, n'était pas seulement une spéculation théorique, mais aussi un procédé pratique au service de la résolution numérique effective. Ces méthodes de résolution numérique effective sont souvent passées sous silence par une histoire des mathématiques qui reste plus attentive aux théories qu'aux pratiques qui les ont fait naître ou qui les ont accompagnées en leur conférant le poids social nécessaire à leur survie ou à leur développement. Il existe sans nul doute une tradition des méthodes de résolution numérique des équations algébriques, dont les méthodes géométriques sont une partie, qui s'est transmise entre les acteurs les plus concernés. En l'absence de formules générales de résolution, les mathématiciens ont cherché des procédés de construction des solutions, tantôt numériques – comme chez Sharaf al-Din al-Tusi [150] – tantôt géométriques. Et cette tradition peut en effet être suivie dans les travaux déjà cités par Favaro, à savoir ceux des mécaniciens grecs, des algébristes arabes, de Descartes et de Newton.

Ces outils ne sont pourtant pas revendiqués par leurs auteurs au même titre que l'approche théorique qui fonde les mathématiques en tant que discipline démonstrative depuis les *Éléments* d'Euclide. Et c'est bien le XIX^e siècle et l'emprise industrielle, technique et mathématique des activités d'ingénieur qui conduit à la reconnaissance explicite et à la synthèse de ces méthodes.

À la fin du XVIII^e siècle, ces mêmes pratiques s'insinuent dans des secteurs d'activité mathématique encore mal circonscrits, où la représentation graphique intervient comme mode de résolution de problèmes. C'est ainsi qu'un traité d'*Arithmétique linéaire* est publié en Angleterre en 1786 pour présenter une étude statistique du commerce et des comptes de l'Angleterre [51]. Ces interventions isolées font partie de celles qui seront développées au début du XIX^e siècle pour être ensuite synthétisées en une discipline. Encore n'envahiront-elles pas pour autant l'ensemble des lieux du savoir mathématique.

C'est bien la rencontre entre les nouvelles géométries et les méthodes du calcul graphique qui détermine sa naissance en tant que discipline dans la culture des ingénieurs, dans la mesure même où elle offre la possibilité d'une unification de pratiques alors locales et disparates, s'exerçant dans leurs milieux d'origine. L'institutionnalisation de la profession d'ingénieur et des formations afférentes a été un facteur important de cette émergence, mais elle n'a pas suffi : c'est précisément la rencontre évoquée plus haut qui fait défaut, bien que pour des raisons différentes, dans les deux premiers pays marqués par la révolution industrielle, la Grande-Bretagne et la France.

En Angleterre, dans la mesure où les ingénieurs ne bénéficient pas d'une formation théorique initiale instituée, la géométrie descriptive elle-même est jugée trop abstraite pour être enseignée directement aux jeunes ingénieurs. Hele Shaw le signalait déjà dans ses rapports des années 1890. Snezana Lawrence a récemment montré dans sa thèse [94] que la géométrie descriptive avait dû être simplifiée et adaptée localement par Peter Nicholson (1765-1844) bien avant d'être enseignée en tant que telle au département d'ingénierie de King's College à Londres en 1839-1841, comme l'indiquent les *Elements of Descriptive Geometry, chiefly designed for Students in Engineering* [57], publiés par le révérend Thomas Grainger Hall (1803-1881) en 1841. Quant à la formation développée dans les Mechanics' Institutes, fondés en 1823 par George Birkbeck (1766-1841), l'accent y est alors mis davantage sur les pratiques que sur la théorie, fût-elle géométrique.

Pour ce qui est de la France, la prégnance idéologique de l'École polytechnique sur le mode de formation des ingénieurs constitue un autre type de frein, qui a fonctionné efficacement dans ce que K. Chatzis qualifie de naissance plusieurs fois ratée de la statique graphique (cf. chap. 5). Malgré l'importance de Monge et l'impact de sa géométrie descriptive au moment de la création de l'École polytechnique, les travaux de Cauchy ont imprimé un tournant analytique radical à l'enseignement des mathématiques pour tout le XIX^e siècle, que plusieurs tentatives de réforme auront beaucoup de difficultés à infléchir.

8.5. Le calcul graphique et ses changements d'échelle au XX^e siècle

Parler d'une apogée du calcul graphique à la fin du XIX^e siècle ne signifie pas que son impact s'estompe au XX^e, mais le changement d'échelle du processus d'industrialisation est mondialement tel que le rôle essentiel de l'ingénieur ne fait plus aucun doute. L'utilisation des méthodes graphiques, intégrées aux manuels, se fait plus discrète, ne s'accompagnant plus des mêmes revendications d'existence (cf. § 8.4). La création de laboratoires de recherche dans l'industrie et de laboratoires technologiques dans les universités brouille les frontières professionnelles et institutionnelles. Théoriciens, expérimentateurs, ingénieurs, industriels s'y mobilisent collectivement, migrant d'un contexte à l'autre pour comprendre et maîtriser des phénomènes nouveaux, et s'investissant fortement dans le développement économique ([80], p. 1-15). Les mathématiques se trouvent ainsi intégrées aux systèmes de production, dans des laboratoires de recherche privés ou publics selon les pays. La Première Guerre mondiale, première guerre industrielle, est tout à fait emblématique de ce changement d'échelle, de ces nouveaux modes de coopération et du renforcement de l'impact socioéconomique des réalisations technologiques. Elle signe également les débuts d'une industrialisation massive de la puissance militaire, phénomène que la Seconde Guerre mondiale ne fera que renforcer. Les développements de la thermodynamique et de l'électricité, puis de l'aviation et des télécommunications, décuplent les potentialités de l'industrialisation bien au delà de la seule mécanique appliquée, notamment dans le champ de la dynamique des fluides et de l'aéronautique.

La formation des ingénieurs en mathématiques est désormais acquise, même si des divergences persistent quant aux choix de ses orientations et font l'objet de débats récurrents. Les méthodes graphiques diffusent dans tous ces nouveaux secteurs, où elles interviennent comme instruments d'exploration entre recherches expérimentales et travail de théorisation, sans que leur utilisation soit particulièrement soulignée en dehors des manuels spécialisés. Ces recherches mobilisent massivement les représentations graphiques obtenues tantôt dans le cadre des méthodes analytiques, tantôt dans l'exploration empirique des propriétés de nouveaux phénomènes.

La mécanisation des méthodes graphiques fait apparaître l'unité de ce champ de recherche, centrée sur la résolution des équations différentielles pour lesquelles il n'existe pas de méthode analytique générale. Les analyseurs harmoniques, puis différentiels, sont essentiels pour en produire des solutions numériques dans de multiples domaines, aussi bien en physique que dans l'industrie. L'abondance des calculs nécessaires à la production des tables de tir pendant la Seconde Guerre mondiale, associée au développement de l'électronique et à une réflexion sur l'unification des méthodes de calcul dans

le cadre de l'effort de guerre, marquera leur industrialisation et la transition des analyseurs différentiels aux ordinateurs.

8.5.1. Un champ nouveau : La navigation aérienne

Aujourd'hui, en ce début du XXI^e siècle, l'aviation est devenue suffisamment présente pour qu'ait disparu le formidable engouement qu'elle a suscité à ses débuts, tant dans l'imaginaire collectif que pour les scientifiques et les industriels, autour de cette « ivresse du rêve millénaire accompli ». Si la Première Guerre mondiale ne marque pas la naissance de la « navigation aérienne »³⁰, elle en fait une arme nouvelle qui la fait basculer de l'ère des pionniers à l'ère industrielle. Du point de vue de la recherche scientifique, les études en ce domaine prolongent celles sur la résistance au vent, menées lors des travaux de construction des ponts et viaducs. Elles sont l'objet de nombreuses expériences, dont les résultats sont traduits graphiquement sous forme de diagrammes qui sont ensuite interprétés pour mettre à jour des lois empiriques confrontées aux approches théoriques des mêmes problèmes. Eiffel s'y consacre énormément après l'affaire de Panama (1889-1892). Il investit sa Tour éponyme d'un nouveau statut de laboratoire aérodynamique, installant à son pied une soufflerie-tunnel et un dispositif expérimental, où il effectue de nombreuses expériences sur la résistance de l'air en vue de leurs applications aux dirigeables et aux vols motorisés (1904-1911). Il passe de l'étude des plaques se déplaçant dans un fluide à l'étude du profil des ailes d'aéroplanes. Établie à Auteuil à partir de 1912, sa nouvelle soufflerie, sans équivalent en Europe, sera utilisée par de nombreuses entreprises industrielles et son mode d'organisation adopté à Rome, Moscou, Stanford et Dayton aux États-Unis, ainsi qu'au Japon. L'étude empirique des caractéristiques dynamiques des profils nécessite des calculs extrêmement longs et complexes, où les méthodes graphiques vont jouer un très grand rôle, avant que ne soient établies théoriquement la portance et la traînée d'un profil d'aile. L'ensemble des expériences réalisées est considérable et fournit aux industriels d'importants résultats, publiés avant la guerre. Le très grand essor de la nomographie peut être replacé dans ce cadre. Les traités de nomographie de Rodolphe Soreau, déjà signalés (cf. § 8.3.5), accompagnent la carrière de ce véritable militant de l'aéronautique. Théoricien de la mécanique des fluides, premier professeur d'aéronautique au CNAM à partir de 1913, et pendant une dizaine d'années à l'École centrale des arts et manufactures, il travaille à en promouvoir une approche théorique et à assurer le développement de l'aviation civile après la guerre, en particulier pour les échanges commerciaux avec les colonies. Eiffel et Soreau sont énergiquement

30. Les premiers « plus lourds que l'air » décollent en 1903 et la traversée de l'Atlantique a lieu en 1919.

soutenus par le programme politique de recherche appliquée lancé par le mathématicien et homme politique³¹ Paul Painlevé (1863-1933), théoricien et propagandiste engagé de l'aviation, qui obtient le vote des premiers crédits pour l'achat d'avions en 1910, associe Eiffel à la STAM (Section Technique de l'Aéronautique Militaire) dès 1911 et impulse la mobilisation industrielle et scientifique en 1915, en organisant la Direction des inventions au service de la Défense nationale ([48], p. 42).

Cette rapide montée en puissance de l'aviation se nourrit d'une circulation des savoirs techniques que la guerre infléchit en fonction de ses systèmes d'alliance militaire. Eiffel travaille régulièrement avec Stéphane Drzewiecki (1844-1938), ingénieur d'origine russe, fixé à Paris en 1889 après une vie errante d'inventeur indépendant qui l'a conduit de France en Pologne, en Autriche et en Russie, où il a travaillé au service du ministre de la Marine, le grand-duc Constantin Nikolaïvitch. Drzewiecki est aujourd'hui célébré en Russie comme l'inventeur du sous-marin : il y produit en effet plusieurs prototypes, jusqu'à une production en série en Russie et en France³². Intéressé par l'aviation à partir de 1885, il continue cependant à travailler pour la marine russe sur les torpilleurs semi-submersibles. Ses articles de 1885 sur le vol des oiseaux sont publiés en France en 1889, et il synthétisera les travaux qu'il mène sur les hélices aériennes et maritimes dans sa *Théorie générale de l'hélice*. La France et la Russie, on le voit, entretiennent des relations privilégiées, tant dans le domaine scientifique que dans le domaine industriel.

L'aérodynamique naissante s'appuie à la fois sur les concepts de l'hydrodynamique et sur des recherches expérimentales où les souffleries jouent un rôle considérable. Dès 1902 en Russie, Nikolaï Iegorovitch Joukovski (1847-1921), fils d'un capitaine ingénieur des chemins de fer de Saint-Pétersbourg, construit à Moscou, avec les moyens du bord, une soufflerie aérodynamique bientôt financée par la société britannique Vickers. Il enseigne l'aéronautique à la nouvelle École impériale technique de Moscou et y fonde en 1904 le

31. Normalien, dès sa thèse sur les fonctions analytiques en 1887, Painlevé s'oriente rapidement vers les problèmes de résolution des équations différentielles, qui représentent alors un enjeu fondamental aussi bien pour la théorie que pour les applications à la mécanique et à la physique. Il travaille à la théorie du vol mécanique dès 1904, avant même que la possibilité de faire voler un « plus lourd que l'air » ait été pratiquement démontrée. Il enseignera la mécanique à l'École polytechnique entre 1905 et 1933. Il soutiendra la conception d'un développement industriel encadré par la science tout au long de sa carrière politique : député en 1910, ministre de l'Instruction publique en 1915, ministre de la Guerre en 1917 et 1926, président de la Chambre en 1924 et président du Conseil en 1925.

32. Le premier prototype est réalisé à Odessa aux chantiers navals Blanchard, le second à Saint-Pétersbourg, avec des hélices fabriquées en France. Cinquante exemplaires du modèle suivant furent réalisés en 1881, pour moitié à Saint-Pétersbourg aux usines Lessner et aux chantiers de la Neva, et pour moitié aux usines Plateau à Paris. Il reçoit en 1896 le deuxième prix du concours Lockroy sur les bâtiments sous-marins organisé à Paris par le ministère de la Marine.

premier laboratoire de recherche aérodynamique en Europe, qui deviendra en décembre 1918, avec Andreï Tupolev et Sergueï Tchaplyguine, le célèbre TSAGI – acronyme russe de l'Institut central d'aérohydrodynamique – par décret du gouvernement soviétique. Les travaux de Joukovski sont déjà connus en France par de nombreuses notes parues dans les *Compte rendus de l'Académie des sciences*, de 1878 à 1890, portant sur la mécanique, l'hydraulique et l'hydrodynamique, et par la version française du *Bulletin du Laboratoire aérodynamique de Kouchtino* [49], disponible à l'Académie des sciences depuis 1906. Lorsque Painlevé prend la direction de la Commission des inventions à Paris en 1915, à la demande d'Émile Borel, il invite officiellement une mission scientifique russe à Paris, qui compte des disciples de Joukovski, parmi lesquels Wladimir Margoulis, Constantin Chilowski et Dimitri Riabouchinski³³. Chilowski, réfugié en Suisse depuis 1904, est d'abord invité par Paul Langevin auquel il a proposé une méthode pour émettre et détecter des ultrasons. Ils produiront ensemble le premier transducteur électromécanique, ancêtre du sonar. Et c'est pour expertiser l'obus à flamme d'ogive inventé par Chilowski que Langevin mettra au point la première soufflerie balistique à grande vitesse, en convertissant la technique à air comprimé utilisée pour les pneumatiques³⁴ ([48], [49]). Parallèlement à ces recherches expérimentales, sous l'impulsion de Painlevé, en 1916, Drzewiecki et Margoulis traduisent en français le cours de Joukovski *Aérodynamique. Bases théoriques de l'aéronautique. Cours professé à l'École impériale technique de Moscou* [75], réédité en 1931, et entreprennent la traduction en russe de l'ouvrage d'Eiffel, *Nouvelles recherches sur la résistance de l'air*.

L'Allemagne mène le même type de recherches à la fois expérimentales et théoriques, mais celles-ci ne seront diffusées qu'après la guerre. Ludwig Prandtl (1875-1953) s'est orienté vers la mécanique des fluides après des études d'ingénieur et un séjour en entreprise où il traite de problèmes d'aspiration. Prandtl arrive à Göttingen en 1904, appelé par Felix Klein au moment où l'université ouvre des instituts techniques, afin d'adapter l'enseignement des mathématiques aux besoins de l'industrie, et où Carl Runge y obtient la chaire de mathématiques appliquées (cf. § 8.3.5). Prandtl et Runge fréquentent le séminaire de Felix Klein sur l'hydrodynamique, appliquée en particulier aux navires, et ils dirigent ensemble le nouvel Institut de méca-

33. Émigré au moment de la révolution soviétique en 1917, Riabouchinski est recruté comme conseiller scientifique à l'Institut aéronautique de Saint-Cyr. Après la guerre, grâce au soutien de Painlevé, il sera reclassé sur la chaire de mécanique des fluides à la faculté des sciences de Paris en 1923.

34. L'invention de la première soufflerie à grande vitesse (450 m/s) est souvent attribuée aux États-Unis parce que Langevin n'a pas déposé de brevet pour cette invention et parce que le lieutenant Sewall, associé à la commission de Gâvre pour les essais de tirs réels dans le cadre de la coopération interalliée, envoie dès 1918 un rapport sur le procédé Langevin à la NACA, National Advisory Committee for Aeronautics, ancêtre de la NASA.

nique et de mathématiques appliquées de Göttingen à partir de 1905. La dynamique des fluides est au cœur de leurs préoccupations. Dès 1904, au Congrès international des mathématiciens d'Heidelberg, Prandtl définit la notion de couche limite pour caractériser la vitesse d'un fluide qui circule le long d'une paroi. Les recherches sur la turbulence, qu'il mène avec son disciple l'ingénieur et physicien hongrois Theodore von Kármán (1881-1963), accueilli en thèse en 1906, vont faire du Aerodynamische Versuchsanstalt (AVA), créé à Göttingen en 1907, le foyer des connaissances aéronautiques des années 1920. Ce centre d'expérimentation, où est construite la première soufflerie allemande en 1908, sera associé au Kaiser-Wilhelm-Institut für Strömungsforschung après 1925. D'abord assistant de Prandtl, à partir de 1913, Kármán poursuit en parallèle ces recherches sur la turbulence comme professeur de mécanique et aéronautique à la Technische Hochschule de Aachen, où se crée également un institut d'aéronautique [36]. L'analyse mathématique et les essais réalisés en soufflerie à partir de 1909 permettront de réduire le fossé entre approche théorique et observations, et d'élaborer une théorie semi-empirique de la turbulence. Mais il faut attendre l'après-guerre pour que ces idées se répandent et entraînent de profondes transformations dans le dessin des ailes et le profilage des avions. La théorie de Prandtl sur la ligne porteuse ne paraît que dans de rares publications à Göttingen, en 1918 et 1919, alors qu'il met au point une nouvelle soufflerie pour étudier les écoulements supersoniques. Kármán présentera ses travaux sur les mouvements tourbillonnaires à la Sorbonne³⁵ en 1925, avant de travailler comme conseiller à partir de 1926 pour la création du Guggenheim Aeronautical Laboratory, au California Institute of Technology (GALCIT) de Pasadena³⁶, laboratoire qu'il dirigera à partir de son installation aux États-Unis en 1930.

Ces recherches en aérodynamique se dotent rapidement de leurs propres publications, à commencer par le *Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik (ZAAM)*, dont le premier numéro paraît en 1921 à l'initiative de Richard von Mises (1883-1953). Les relations internationales établies

35. D'après Mounier-Kuhn cependant ([119], p. 82), « Les travaux de Prandtl et de ses disciples ne seront vraiment pris en compte en France qu'après 1945 ».

36. Les abondantes publications et les nombreux titres honorifiques de Kármán témoignent de l'activité scientifique incessante d'un ingénieur fortement concerné par les implications politico-militaires de la science aéronautique. Dès 1922, il impulse la création de congrès internationaux, d'abord de mécanique appliquée, puis d'aéronautique, qu'il organisera toute sa vie. Devenu citoyen états-unien en 1936, il inaugure les recherches sur les fusées, fondant à la fois le Jet Propulsory Laboratory au California Institute of Technology en 1938, et la société Aerojet Engineering Corporation en 1942. À partir de 1944, sollicité par le commandant des forces armées aériennes des États-Unis, Kármán organise et dirige le Scientific Advisory Group, chargé d'étudier les conditions d'une mobilisation militaire de la science aéronautique, qui débouchera en 1951 sur la coopération entre l'US Air Force et le Military Standing Group de l'OTAN, jusqu'à l'organisation de l'International Council of the Aeronautical Sciences en 1958.

entre les ingénieurs au XIX^e siècle s'institutionnalisent alors autour de ces nouvelles recherches, par le biais de la création en 1924 de la *Gesellschaft für Angewandte Mathematik und Mechanik*, dans laquelle Kármán a joué un rôle majeur, et de l'organisation de congrès internationaux de mécanique appliquée, dont le premier se réunit à Delft (Pays-Bas) en 1924.

8.5.2. Le calcul graphique entre science et industrie

L'aérodynamique n'est pas le seul domaine à signer le rapprochement entre recherches théoriques et expérimentales, comme en témoigne la création en Allemagne de la *Deutsche Gesellschaft für technische Physik* en 1919, et de son journal, le *Zeitschrift für technische Physik* en 1920, lui aussi à vocation internationale. Après les réseaux de communication territoriaux et aériens, l'invention du télégraphe, du téléphone et de la télégraphie sans fil (TSF) débouche sur de nouvelles reconfigurations technologiques autour de ces nouveaux modes d'information immatérielle, dont la maîtrise repose à la fois sur la compréhension des phénomènes physiques et sur l'établissement d'une production industrielle de masse. Pendant l'entre-deux-guerres, les méthodes graphiques vont également prendre pied dans l'industrie, là où les grandes firmes créent des bureaux d'études auxquels collaborent physiciens et mathématiciens, élaborant de front les connaissances scientifiques et les conditions techniques de cette production. C'est principalement le cas en Allemagne et aux États-Unis, dans les secteurs à forte innovation technologique où l'industrie électrique devient industrie de communication.

C'est ainsi qu'en Allemagne, la firme OSRAM, spécialisée dans la production des lampes électriques à filament, s'oriente vers la production de masse des tubes à vide dans les années 1920, au moment du développement de la technologie sans fil. Dans ce domaine comme dans celui de la navigation aérienne, les études empiriques et théoriques sont d'abord menées en parallèle. Heinrich Barkhausen (1881-1956), directeur d'un nouvel Institut des communications – Institut für Schwachstromtechnik – à la Technische Hochschule de Dresde, obtient empiriquement l'équation qui porte son nom, reliant les principales caractéristiques du tube à vide, tandis que Walter Schottky (1886-1976), directeur scientifique du laboratoire de recherche de la compagnie Siemens, travaille à sa modélisation. L'entreprise OSRAM travaille en relation étroite avec Telefunken sur les tubes à vide et entretient des relations internationales avec General Electric Company à Londres et à New York. Une des filles de Carl Runge, Iris Runge (1888-1966), y entre comme consultante en 1923, après une formation universitaire à Göttingen et Munich, où elle étudie la physique sous la direction du théoricien Arnold Sommerfeld (1868-1951) et prépare une thèse de chimie physique sous la direction de Gustav Tammann (1861-1938). Elle est nourrie des nouvelles méthodes du

calcul graphique et de l'analyse numérique développées non seulement par son père, mais aussi dans l'*Aerodynamics* de Frederick William Lanchester (1868-1946) [93], qu'elle traduit en 1908 – avec ses parents –, dans le *Graphische Darstellung in Wissenschaft und Technik* du physicien Marcello Pirani (1880-1968), publié en 1914 [140]. Les publications des nouveaux journaux de physique et de mathématiques appliquées (cf. § 8.4.1), notamment celles de von Mises, lui aussi ingénieur en aérodynamique avant d'être reconnu comme spécialiste de théorie des probabilités, font partie intégrante de la culture d'Iris Runge, tout comme les travaux mathématiques de son beau-frère Richard Courant³⁷ (1888-1972). Ce sont ces méthodes nouvelles qu'Iris Runge investit et améliore chez OSRAM, où elle travaillera jusqu'en 1945 – d'abord sous la direction du chimiste Richard Jacoby (1877-1941) – à la modélisation mathématique des tubes à vide, centrée sur la théorie de l'émission des électrons et les caractéristiques physiques des tubes. À partir de 1934, elle rédige régulièrement des rapports de laboratoire – restés confidentiels – sur l'évolution des contrôles de qualité, qui mettent les méthodes graphiques au service de l'approche statistique [172].

Iris Runge écrit son premier article sur le sujet dès 1923 [152]. Son ouvrage de 1927 sur les applications des statistiques aux problèmes de la production de masse [153] est le premier dans ce domaine qui témoigne de collaborations essentielles entre universités et industrie³⁸, même si l'avènement du nazisme les a rendues plus difficiles. Les résultats en seront rapidement incorporés dans les manuels. Sans doute du fait d'une absence de diffusion, cette contribution essentielle d'Iris Runge à la mise en place des contrôles de qualité en entreprise, via leur modélisation statistique et graphique, est beaucoup moins connue que celle du physicien Walter Andrew Shewhart (1891-1967). Ce dernier est traditionnellement considéré comme le père du contrôle statistique de qualité, développé dans le premier département de recherche mathématique du monde industriel, créé par Thornton Fry (1867-1941) à la fin des années 1920 au sein des Bell Telephone Laboratories de la compagnie American Telephone & Telegraph (AT&T), qui étaient alors les plus grands laboratoires industriels au niveau mondial. Les désastres du

37. En 1936, Iris Runge se rendra aux États-Unis, où elle rencontrera G. Ross Kilgore au sujet du magnétron dans son laboratoire de la Radio Corporation of America (RCA) à Harrison dans le New Jersey. Elle rendra également visite à sa sœur Nina et à Richard Courant son époux, émigrés en 1933. Elle tentera en vain de les y rejoindre, mais son ami George Sarton, alors maître de conférences en histoire des sciences à Harvard, ne parviendra pas à lui trouver un poste. Elle travaillera chez Telefunken de 1939 à 1945 et s'orientera vers l'histoire des sciences après la guerre, traduisant en 1962 le livre *What is mathematics?* de Courant.

38. Elles se manifestent également par les nombreux universitaires qui vont travailler tant à OSRAM qu'à Telefunken : Dr Willy Statz, Dr Herbert Daene, Dr Peter Kniepen, Dr Rudolf Sewig, Dr Conrad Meyer.

nazisme constituent sans aucun doute un facteur déterminant dans cette absence de reconnaissance historique du travail d'Iris Runge, bien qu'il ait diffusé malgré tout dans l'industrie allemande. Aux États-Unis comme en Allemagne, ces méthodes statistiques – associées aux méthodes graphiques qui en rendent l'utilisation accessible aux différents niveaux du processus de fabrication, de l'atelier au bureau d'études – réussirent précisément dans la mesure où elles furent intégrées à l'ensemble du système productif, à l'échelle de l'entreprise tout entière et du fournisseur au client. Cette implantation verticale des « cartes de contrôle » fut le facteur le plus déterminant de leur implantation, de l'identification de leur fonction, de leur reconnaissance et de leur transfert à d'autres secteurs industriels. *A contrario*, comme l'a découvert et analysé très précisément Denis Bayart [7], de telles analyses statistiques des conditions d'acceptation ou de rejet de lots d'objets fabriqués, à partir d'un contrôle sur échantillon, avaient déjà été développées sur des bases très proches, notamment dans l'artillerie en France au début du siècle pour la fabrication d'obus, sans être pour autant reconnues autrement que comme curiosité mathématique. Alors que les « cartes de contrôle » de Shewhart sont insérées, du fait de la politique de AT&T, au cœur d'un dispositif organisationnel qui va déboucher sur une redéfinition des méthodes de travail et sur une véritable culture du contrôle et de la régulation [157], le « calcul des cotes » du chef d'escadron Jean-Baptiste Eugène Estienne en 1903 et de l'ingénieur d'artillerie navale Maurice Dumas en 1925, ne parviendront pas à transformer le processus de réception des fusées d'obus géré par l'administration militaire et ceci bien qu'ils aient dégagé l'idée d'une constance des conditions de fabrication qu'on retrouvera dans la théorie états-unienne. Ainsi, si les méthodes graphiques jouent un rôle crucial dans l'entreprise, par les facilités qu'elles offrent pour traduire les procédures de contrôle en moyens opérationnels dans la lecture et l'interprétation des résultats à tous les postes de travail, leur seule présence ne suffit pas à transformer l'histoire des politiques de qualité, qui s'accompagne aux États-Unis du basculement d'une représentation déterministe – laplacienne – à une représentation pragmatiste – d'inspiration peircéenne – du processus de production, dont le contrôle s'effectue désormais à l'échelle collective des lots fabriqués plutôt qu'à celle d'une recherche de l'objet parfait.

8.5.3. La mécanisation du calcul

La mécanisation du calcul accompagne de manière essentielle ces développements techno-scientifiques, aussi bien à l'université que dans l'industrie. Les analyseurs harmoniques, qui se sont diversifiés depuis l'invention de Lord Kelvin, interviennent dans de très nombreux domaines des sciences appliquées. Le catalogue de l'Institut mécano-mathématique Coradi de Zürich

pour l'année 1900 insiste, dans la présentation de ses instruments de précision, sur la multiplicité des applications couvertes par son analyseur n° 50 à cinq intégrateurs, qui permet d'obtenir les coefficients du développement d'une fonction périodique en série de Fourier jusqu'au 100^e harmonique : analyse des courants alternatifs et de haute fréquence, télégraphie sans fil, étude des vibrations, des cycles et des couples des moteurs, hydrodynamique, aérodynamique, acoustique et phonétique, élasticité et résistance des matériaux, météorologie, hydrographie, séismologie, navigation aérienne et maritime, constructions navales, statistiques économiques et financières, balistique et pyrotechnie, thérapeutique. Un tel analyseur, de type 10c, a été acquis en 1930 par la marine française, qui l'utilisera jusqu'en 1960 environ³⁹. C'est le seul modèle qui ait jamais été construit pour des coefficients jusqu'au 150^e harmonique⁴⁰ [117].

Ces analyseurs accompagnent notamment le développement des nouveaux domaines de la physique fondés sur l'application de l'analyse de Fourier. Produit à partir de 1929, l'analyseur de la firme Mader-Ott, plus léger et plus maniable que celui de William Thomson, succède à l'analyseur Mader-Stärzl (cf. § 6.12.5 et § 6.12.6). Il est particulièrement adapté aux recherches en laboratoire ([182], cf. § 8.3.4). Pierre-Michel Duffieux (1891-1976), professeur de physique à l'université de Rennes, puis à celle de Besançon, lui accorde un rôle déterminant dans la réorientation de sa carrière et dans la naissance de l'optique de Fourier. Il raconte comment, après son doctorat sur la spectroscopie des interférences en 1925, alors qu'il se livre à l'analyse mathématique du problème des aberrations des franges dans l'interféromètre de Michelson, un ingénieur de l'Institut d'optique lui fait découvrir le nouvel analyseur harmonique de Mader-Ott⁴¹, issu d'une évolution du planimètre d'Amsler [67]. C'est grâce aux résultats obtenus avec cet instrument qu'il fonde dès 1941 « l'optique de Fourier », dégageant des méthodes et des concepts nouveaux fondés sur les convolutions, dans un milieu très peu formé à ces mathématiques. Son ouvrage, *L'analyse de Fourier et ses applications à l'optique*, préparé pendant la Seconde Guerre mondiale et publié à compte d'auteur en 1946 [29], sera largement diffusé à l'étranger –

39. Les calculs restent longs, puisque ces harmoniques sont obtenus par passages successifs de la courbe devant les cinq intégrateurs. Les résultats obtenus grâce à cet analyseur sont complétés par le prédicteur de marées, dont le Service hydrographique de la Marine acquerra deux exemplaires, successivement en 1901 et 1955, auprès de la firme initialement créée par Kelvin (cf. § 8.2.4, [34]).

40. Le « 200 » qui est gravé sur l'appareil indique qu'il s'agit du 200^e exemplaire d'un analyseur harmonique Henrici-Coradi, ces analyseurs étant ainsi numérotés depuis 1893-1894. Il se trouve aujourd'hui, en excellent état, au Bassin d'essais des carènes (ministère de la Défense, Chaussée du Vexin, 27100 Val-de-Reuil).

41. Cet analyseur se trouve aujourd'hui au laboratoire d'optique de l'université de Besançon, qui porte le nom de Pierre-Michel Duffieux.

États-Unis, Angleterre, Suède, Japon, Australie – avant d'être pleinement reconnu en France en 1959, lorsque Max Born et Emil Wolf le citeront dans *Principles of Optics* [66]. Il reste aujourd'hui au cœur de l'étude de la formation et du traitement analogique des images, thème devenu central depuis sa rencontre avec l'électronique et le développement de tous les médias audiovisuels – télévision, internet, nouvelle téléphonie mobile.

L'analyseur de Mader-Ott accompagne ainsi tous les champs où se déploie l'analyse spectrale pendant cette période. L'analyse harmonique du son, notamment de la parole, a d'abord été réalisée graphiquement par des phonéticiens à la fin du XIX^e siècle, avant de bénéficier de l'apport de ces analyseurs – Coradi, puis Mader-Ott – jusque dans les années 1950, surtout dans le cas des signaux lents ou transitoires, dont les masses de calcul restent considérables et sont souvent confiées d'ailleurs à des communautés monastiques⁴². L'analyseur de Mader-Ott devient un instrument de laboratoire indispensable pour mener à bien le traitement des données obtenues expérimentalement, à savoir les courbes de fonctions périodiques. L'analyse harmonique associée permet d'établir des corrélations – ou leur absence – entre différents phénomènes physiques et de démontrer l'existence de propriétés – de lois empiriques – spécifiant les phénomènes étudiés. La diffraction des rayons X est ainsi utilisée pour étudier la structure des matériaux dans l'industrie [2]. C'est par l'étude de cette diffraction à température élevée sur des sels fondus que le centre de recherches des Glaceries de Saint-Gobain apporte la « première preuve expérimentale directe de l'existence de "trous" dans le milieu des sels fondus », par comparaison avec leur structure à l'état cristallin [188]. En chimie, l'Institut de physique de l'Académie de Bucarest utilise ce même analyseur en 1957 pour modéliser la structure amorphe des couches de germanium [56]. En géophysique, il permet d'apporter une précision satisfaisante dans l'analyse des données fournies par les séismogrammes [78]. Et c'est par l'astrophysique que le calcul analogique s'introduit en astronomie, où le calcul des tables a persisté à utiliser des méthodes de calcul numérique, en raison d'un plus grand besoin de précision. L'université de Tübingen effectue l'analyse harmonique de clichés photographiques pour établir expérimentalement les propriétés de l'intensité du scintillement stellaire [114].

De semblables développements, moins connus⁴³, ont lieu en Europe de l'Est, qui commencent à être étudiés [35]. Le développement des méthodes graphiques et de la mécanisation du calcul qui a lieu en Tchécoslovaquie

42. L'analyse de la parole est plutôt traitée électroniquement à partir des années 1930 [163].

43. Bien que l'ouvrage *Computing in Russia* [107] affirme dans son introduction vouloir produire une « archéologie du savoir » inspirée de Michel Foucault, il ne traite l'histoire de l'informatique en URSS qu'à partir de l'histoire des machines arithmétiques digitales.

après la Première Guerre mondiale à partir de l'établissement de la nouvelle République en offre un exemple caractéristique. Le mathématicien et astronome Václav Láška (1862-1943) participe à la création des institutions scientifiques tchèques, et travaille sur les mathématiques pratiques, notamment sur les instruments de nivellement. Avec Václav Hruška (1888-1954), il publie en 1923 *Počít grafický a graficko-mechanický* (Calcul graphique et mécanique) qui traite des méthodes de calcul relatives aux planimètres, intégraphes, intégrateurs et analyseurs harmoniques. Sur leurs traces, l'ingénieur Antonín Svoboda (1907-1980), diplômé et enseignant de l'Université technique de Prague, élabore un calculateur analogique avant la Seconde Guerre mondiale. De retour du MIT en 1946, il inaugure un cours sur les machines mathématiques sur la base de son ouvrage *Computing Machines and Linkages* avant de monter un laboratoire du même nom (1952), d'où il lancera la technologie des ordinateurs en Tchécoslovaquie.

8.5.4. Les analyseurs différentiels

Lorsque William Thomson avait conçu et produit l'analyseur harmonique en 1876 (cf. § 8.2.4), il avait déjà envisagé la possibilité d'utiliser une machine de même type qui, grâce à deux intégrateurs, matérialiserait la méthode des approximations successives et pourrait ainsi fournir une solution numérique d'une équation différentielle linéaire du second ordre à coefficients variables. Boucler le processus de résolution, de telle sorte que le résultat obtenu à la sortie du premier intégrateur soit réintroduit en entrée du suivant, permettrait de faire converger le processus vers une solution exacte, ce que Thomson avait également envisagé pour une équation différentielle d'un ordre quelconque à coefficients variables (cf. § 7.4.3, [168], [169]). Mais la complexité des mécanismes d'entraînement associés à ce mode de résolution butait alors sur des difficultés techniques que Thomson n'était pas en mesure de résoudre, car les articulations mécaniques de cette époque ne supportaient pas les tensions nécessaires à la transmission des mouvements d'une partie à l'autre de la machine.

Dès cette époque, la circulation de la pensée technique est alors bien réelle (cf. § 8.3) et l'idée de Thomson ne reste pas lettre morte. Dans la Russie industrielle et maritime du tout début du xx^e siècle, en pleine guerre russo-japonaise, l'ingénieur naval Krylov, qui a commencé sa carrière en 1884 au Service central d'hydrographie, puis dans les arsenaux de la Compagnie navale franco-russe, est devenu professeur de mathématiques et de construction navale à l'Académie navale de Saint-Pétersbourg. Il enseignera pendant cinquante ans dans cette institution militaire, où il développera une importante école de construction navale, tout en assumant d'importantes fonctions

administratives et politiques⁴⁴. En 1898, il reçoit la médaille d'or de la Royal Institution of Naval Architects pour sa *Théorie des oscillations du navire*⁴⁵. Ses tables de flottabilité sont vite connues et utilisées dans le monde entier. Ses abondants travaux s'étendent à tous les domaines concernés par la marine militaire : hydrodynamique navale, astronomie, géodésie, magnétisme et artillerie. Et les problèmes mathématiques dont il traite nécessitent des solutions numériques. Krylov a pris connaissance de la théorie des planimètres dans le *Mémorial du génie maritime* de 1874 [81] et de l'ensemble des travaux de Lord Kelvin sur l'intégration mécanique dans le *Treatise of Natural Philosophy* de W. Thomson et P. G. Tait ([168], [82]). Dans le cadre de ses recherches pour la marine impériale sur la vibration des coques de navires au bassin d'expérimentation de l'Académie maritime, il entreprend la construction d'un analyseur différentiel, destiné dans son principe à « l'intégration mécanique des équations différentielles ordinaires de n'importe quel ordre et quelle forme », de fait à celle d'une équation différentielle linéaire du quatrième ordre à coefficients variables. Si cet analyseur différentiel est effectivement construit par le mécanicien de précision R. Wetzer à Saint-Petersbourg (cf. § 7.5.2), sa réalisation met à l'épreuve les difficultés dans la transmission des mouvements entre intégrateurs déjà rencontrés par Thomson.

Le changement d'échelle intervient véritablement dans les années 1930, où de nouvelles convergences se mettent en place, qui vont conduire à surmonter ces difficultés, d'abord aux États-Unis et en Angleterre. Ce changement d'échelle est assez colossal. Il transformera radicalement l'activité mathématique au sortir de la Seconde Guerre mondiale, signant une valorisation essentielle du calcul, mais aussi, à terme, un effacement progressif des méthodes analogiques.

Du point de vue des besoins, les équations différentielles interviennent dans des domaines de plus en plus nombreux, aussi bien en physique qu'en chimie, en biologie et en économie. Avec le développement des réseaux électriques et téléphoniques, l'ingénierie électrique n'est plus seulement confrontée à la résolution des équations différentielles linéaires, mais à celles d'équations différentielles quelconques « dont la non-linéarité est le caractère principal » ([19], p. 449). Le département d'ingénierie électrique du Massachusetts Institute of Technology (MIT) s'attache à développer les moyens mécaniques susceptibles de répondre à cette demande sans cesse accrue de solutions numériques, aussi bien pour les équations algébriques que différentielles. Ingénieur de formation, formé à Harvard et au MIT, Vannevar Bush y

44. En 1917, il remettra tous ses navires au nouveau gouvernement de l'URSS. En 1921, dans un contexte diplomatique des plus difficiles, il représentera le gouvernement soviétique à Londres, avec pour mission de renouer des contacts scientifiques.

45. Il est le premier scientifique non britannique à recevoir une telle distinction.

est alors professeur associé depuis 1919 et a travaillé sur les problèmes de détection sous-marine pendant la Première Guerre mondiale. C'est sous sa responsabilité qu'est produit l'analyseur différentiel entre 1927 et 1931 ([17], [18]). Bush a pu surmonter le blocage technique sur lequel avait buté Lord Kelvin dans sa démarche, à la fois grâce à l'entraînement électrique de la machine et à l'amplificateur de torsion qui, fonctionnant sur le principe du cabestan, permet désormais de faire fonctionner deux intégrateurs en série. L'analyseur différentiel est d'abord destiné au calcul des tables de tir pour la défense anti-aérienne, qui doit alors s'adapter à l'amélioration de la vitesse et de la hauteur de vol des avions depuis la Première Guerre mondiale, mais la modification du montage des mécanismes opératoires – additionneurs, multiplicateurs, intégrateurs – permet d'étendre considérablement le champ des possibilités de résolution des équations différentielles.

Le MIT est une institution typiquement états-unienne, caractérisée par les relations privilégiées qu'elle a établies dès sa création entre science et industrie. L'ingénieur y est au cœur du système de formation et de l'organisation de la recherche. Et les institutions créées pour assister l'effort de guerre pendant la Seconde Guerre mondiale ne feront que renforcer le caractère pluridisciplinaire d'une recherche où les ingénieurs seront pleinement investis. Bush occupera une position stratégique, présidant successivement le National Defense Research Committee, créé par le président Roosevelt en 1940, puis l'Office of Scientific Research and Development en 1941, afin de coordonner le travail scientifique entre l'armée, l'industrie et l'université [154]. L'analyseur différentiel n'est pas la seule machine analogique élaborée au MIT pour résoudre les problèmes associés au non-linéaire et aux questions d'hydrodynamique. C'est ainsi que l'ingénieur mathématicien Nicolas Minorsky (1885-1970) élabore dès 1936 des « analogues dynamiques » qui lui permettent de représenter physiquement les solutions d'équations différentielles classifiées selon une approche qualitative directement inspirée de celle de Poincaré [138]. Bien que peu connu, Minorsky offre d'ailleurs un autre exemple assez emblématique des émigrations dont bénéficient les États-Unis pendant l'entre-deux-guerres. D'origine russe, il a été formé à l'École navale de Saint-Pétersbourg en 1908, puis à l'École polytechnique impériale de Moscou (1911-1914) avant de travailler comme ingénieur à la General Electric à New York et de s'engager dans la résolution des problèmes de stabilité et de contrôle automatique des navires pour la marine des États-Unis. Mais l'attention semble alors plutôt portée vers les grosses machines et vers l'étude quantitative des équations différentielles, et les idées de Minorsky ne trouveront pas véritablement d'écho au MIT.

D'autres analyseurs différentiels sont assez rapidement construits en Europe, à commencer par la Grande-Bretagne. Le physicien Douglas Rayner

Hartree (1897-1958), Beyer professor of applied mathematics (1929-1937) à l'université de Manchester, s'intéresse à la machine de Bush dès qu'il est informé de son existence en 1931. Hartree est féru d'analyse numérique depuis qu'il a aidé son père dans les calculs de balistique pour l'artillerie anti-aérienne pendant la Première Guerre mondiale, où le tir à grand angle présentait des problèmes nouveaux pour le calcul des trajectoires. Issu d'une longue lignée d'ingénieurs, diplômé en 1926 du Cavendish Laboratory où Rutherford et Bohr attirent alors des étudiants du monde entier autour de la nouvelle physique atomique, Hartree est rapidement en contact avec toute la communauté scientifique concernée par ses nouveaux développements, notamment Ehrenfest et Einstein à Leyde en 1923, George Gamow – de l'université de Léningrad – à l'institut de Niels Bohr de Copenhague en 1928, Lindsay à Manchester en 1937⁴⁶. Il va mener de main de maître les calculs qu'exige la confrontation entre son étude expérimentale et sa théorisation mathématique, reformulant les problèmes afin de faciliter l'intégration numérique des équations différentielles relatives aux implications de la théorie de Bohr et à l'équation de Schrödinger quant à la quantification des états d'énergie dans la structure de l'atome : spectroscopie atomique, propagation des ondes électromagnétiques, théorie des champs auto-consistants [46]. Hartree voit immédiatement l'intérêt qu'il peut tirer de l'analyseur différentiel pour la conduite de ces calculs. Il rend visite à Bush en 1932 et 1933 pour se familiariser avec le fonctionnement de la machine, qu'il utilise pour les calculs associés à sa théorie des champs auto-consistants, tout en percevant ses potentialités pour le traitement des équations différentielles sans solution formelle de la physique et de l'ingénierie électrique. De retour à Manchester avec les plans de l'analyseur différentiel⁴⁷, il construit un modèle expérimental en Meccano dès 1934 [61] et en fait réaliser un modèle complet par la firme Metropolitan-Vickers Electrical Company Ltd en 1935, alors grâce à un don personnel du trésorier de l'université de Manchester, Robert McDougall (1871-1938) ([63], [64]). Devenu professeur de physique appliquée en 1937, toujours à Manchester, Hartree est affecté au ministère de l'Approvisionnement en 1939, où il va diriger de très nombreux comités scientifiques. Servi par ses étudiants les plus mobilisés sur le sujet – Arthur Porter, Jack Howlett, John Crank –, l'analyseur différentiel de Manchester va travailler intensément pendant toute la durée de la guerre aux calculs de balistique, notamment pour les systèmes automatiques de guidage des armes anti-aériennes, ainsi qu'à l'étude du magnétron. Mais il faut également citer, dès avant la guerre : l'étude de la propagation des ondes après déflagration

46. Bohr, Heisenberg, Bush, Lennard-Jones et Wilkes seront reçus chez les Hartree à Manchester, parmi de nombreuses autres personnalités scientifiques ([46], p. 82).

47. Ces plans que lui confie Bush avaient été établis par Steve Rosseland, qui projetait de construire un analyseur différentiel à l'université d'Oslo dès 1933.

dans le domaine de la physique de l'atmosphère et de l'hydrodynamique ; le prolongement des travaux de Prandtl sur la couche limite dans le domaine de l'aéronautique, en compagnie de Leslie John Comrie (1893-1950) et de ses machines de bureau ; le calcul des fonctions d'onde en chimie théorique ; le calcul des horaires de train, un sujet qui passionnait aussi Hartree ; et des applications industrielles essentiellement dans l'étude des servo-mécanismes ([62], [63], [64]).

D'autres analyseurs différentiels seront également construits, le premier à Cambridge en 1938-1939, sous l'impulsion de John Edward Lennard-Jones (1894-1954) et Maurice Wilkes (1913-2010), où il devient la pièce maîtresse du Mathematical Laboratory⁴⁸, ainsi qu'à Belfast et Farnborough pour la Grande-Bretagne⁴⁹, mais aussi en Norvège, et dans d'autres laboratoires de recherche pour les États-Unis, au Ballistic Research Laboratory dans le Maryland et à la Moore School of Electrical Engineering à l'université de Pennsylvanie pendant la guerre, avant le fameux ENIAC (Electronic Numerical Integrator and Computer). Associé à Samuel Hawk Caldwell (1904-1960), Bush conduira pendant toute la guerre le projet d'un super analyseur différentiel, le Rockefeller Differential Analyzer, conçu comme la pièce maîtresse du centre de calcul du MIT, qui se révélera pourtant obsolète au moment de la construction de l'ENIAC à la fin de la guerre [20].

Le même type de développement a lieu parallèlement en URSS, où la révolution soviétique amplifie le mouvement d'industrialisation en installant les interactions entre théorie et pratique au cœur de son idéologie⁵⁰. Avant de fonder l'informatique soviétique, Sergeï Alexeevich Lebedev (1902-1974), cet ingénieur diplômé de l'École technique supérieure de Moscou (1928), est spécialiste de l'électricité à haute tension et mène ses recherches au sein de l'Institut du génie électrique de l'Académie des sciences de Moscou sur la stabilité des systèmes fournissant de l'énergie. Il en deviendra directeur après la guerre. La conception des centrales et l'étude des réseaux électriques le conduisent, tout comme Isaac Semenovich Bruk (1902-1974), à s'intéresser à l'automatisation des calculs indispensables à la résolution des systèmes complexes d'équations différentielles que requièrent leurs travaux. Inspirés par l'analyseur différentiel de Bush, ils construiront de telles machines analogiques dans les années 1930 avant de se tourner vers le calcul digital ([107], [180]).

À la fois tous ces auteurs et ces lieux institutionnels seront directement impliqués dans l'élaboration des premiers ordinateurs, surtout le Ballistic

48. Il deviendra le Cambridge Mathematical Laboratory en 1945, avec Wilkes comme directeur dès 1946.

49. Sans compter des versions amateur plus petites.

50. Lénine ne définissait-il pas le socialisme comme « le pouvoir des soviets plus l'électrification » [180] ?

Research Laboratory dans le Maryland et la Moore School of Electrical Engineering. Lebedev, entouré de toute une équipe de mathématiciens et d'ingénieurs près de Kiev, produira la Malaia elektronnaia schetnaia mašina (MESM) entre 1947 et 1951. De son côté, Hartree, impliqué dans la construction de l'ENIAC aux États-Unis, en écrira la première description technique et travaillera sur l'élaboration du premier ordinateur à Cambridge. Il produira un travail de synthèse sur les machines mathématiques de calcul en 1949 [65]. Bien que ceci soit une autre histoire, il convient de rappeler qu'outre les apports de l'électronique et de la logique mathématique, la réflexion sur l'organisation des articulations mécaniques de ces machines a été déterminante dans l'élaboration des programmes enregistrés des ordinateurs.

Conclusion

Cette historiographie du calcul graphique et graphomécanique constitue un exemple flagrant du fait que les mathématiques n'ont pas pour seule signification la vérité logique interne de conclusions déduites des hypothèses. De nombreux autres éléments interviennent de manière constitutive dans ce que cette discipline signifie, qui concernent l'ensemble de ses finalités, notamment la possibilité d'une institutionnalisation de son enseignement et de la profession qui la porte – c'est-à-dire qui la fait naître et la développe – ainsi que la possibilité d'interactions constantes entre réflexion théorique et pratiques du calcul, aussi bien sur le terrain que dans le bureau d'études et au contact des autres branches des mathématiques. Comme l'a montré cette étude, ces significations peuvent d'ailleurs dépendre du milieu culturel qui s'exprime à son sujet, et de sa fonction de producteur ou de récepteur. En effet, en dépit de l'existence de méthodes graphiques depuis l'Antiquité, ces méthodes ne peuvent être considérées comme relevant de la préhistoire du calcul graphique qu'à partir d'un regard rétrohistorique jeté sur ces méthodes après la constitution d'une discipline qui n'était alors pas même imaginée et qui répondait à bien d'autres exigences que celles du calcul graphique. Contrairement à une conception du langage véhiculée au moins depuis Descartes, selon laquelle le problème de la signification – celle des mathématiques en particulier – se résumerait à grammaire (syntaxe) et dictionnaire (sémantique), les mathématiques prennent tout leur sens dans un contexte donné. Elles le perdent, le conservent ou le transforment selon l'évolution des enjeux. Le calcul graphique et graphomécanique s'est constitué en discipline en même temps que l'art de l'ingénieur devenait science industrielle. Il s'est révélé nécessaire pour réaliser graphiquement ou mécaniquement des calculs que l'analyse mathématique ne permettait pas d'obtenir, ou que la répétition et le grand nombre d'opérations auraient rendus fastidieux et dis-

pendieux. Il témoigne du fait que l'histoire des mathématiques ne se déroule pas seulement dans le cercle protégé des universités, mais au contact des réalités du monde, tout particulièrement au cours des deux derniers siècles, pour ce qui concerne les développements de la physique et ses implications économique-politiques, notamment du fait des deux guerres mondiales. Si l'ingénieur contribue toujours au développement de la science industrielle, il a développé, en collaboration avec le mathématicien et le logicien, cet outil très puissant qu'est l'ordinateur, qui tend à se substituer à l'ensemble de ces méthodes. Il n'empêche que le calcul graphique continue de produire des résultats même après les années 1950 alors que l'histoire des mathématiques fait l'impasse sur ces méthodes. Et d'un point de vue épistémologique, les questions soulevées par ce type de calcul demeurent et peuvent continuer à être analysées lorsqu'il est pris en charge par d'autres outils, notamment par l'analyse numérique.

Bibliographie du chapitre 8

- [1] ABDANK-ABAKANOWICZ (Bruno), *Les intégraphes. La courbe intégrale et ses applications*, Paris : Gauthier-Villars, 1886.
- [2] ADLER (Ralph P. I.) & WAGNER (Christian N. J.), X-ray diffraction study of a bulk, polycrystalline Ag-9 at. pct Sn alloy deformed in compression, *Metallurgical and Materials Transactions B*, 1 (1970), p. 2791-2797.
- [3] ALLARD (Émile), *Mémoire sur l'intensité et la portée des phares, comprenant la description de quelques appareils nouveaux, ainsi que des études sur la transparence des flammes, la vision des feux scintillants et la transparence nocturne de l'atmosphère*, Paris : Imprimerie nationale, 1876.
- [4] ALLIX (Georges-Jean-Baptiste-François), *Explication d'un nouveau système de tarifs, ou Nouvelle méthode pour trouver, en mesures métriques, sans aucun calcul, le poids des métaux en barres ou en feuilles, le cube des bois bruts ou équarris, le cube des pierres de taille...*, Paris : Bachelier, 1840.
- [5] ANDRADE (Jules), L'enseignement scientifique aux écoles professionnelles et les « Mathématiques de l'ingénieur », in *Verhandlungen des dritten internationalen Mathematiker-Kongresses in Heidelberg vom 8. bis 13. August 1904*, Adolf Krazer (éd.), Leipzig : Teubner, 1905, p. 622-626.
- [6] ANGOT (André), *Compléments de mathématiques à l'usage des ingénieurs de l'électrotechnique et des télécommunications*, Paris : Éditions de la Revue d'Optique, 1961.
- [7] BAYART (Denis), Des objets qui soutiennent une théorie : l'histoire du contrôle statistique de fabrication, in *Des savoirs en action, vers une approche cognitive de la gestion*, Florence Charue-Duboc (éd.), Paris : L'Harmattan, 1994, p. 139-173.
- [8] BACHELLIER (J.) & GARDY (Henri), Application du calcul symbolique graphique à l'étude des systèmes différentiels linéaires, *Annales de la faculté des sciences de Toulouse (4)*, 18 (1954), p. 161-177.
- [9] BAZIN (Henry) & DARCY (Henry), *Recherches hydrauliques*, Paris : Imprimerie impériale, 1865.
- [10] BELGRANO BRÉMARD (Juan Carlos), *Tratado de nomografía*, con la colaboración de Antonio López Nieto y José María Urcelay, prólogo Julio Rey Pastor, Madrid : Instituto Técnico de la Construcción y del Cemento, 1953.
- [11] BELHOSTE (Bruno), *La formation d'une technocratie : l'École polytechnique et ses élèves de la Révolution au Second Empire*, Paris : Belin, 2003.
- [12] BOYER (Carl Benjamin), Early graphical solutions of polynomial equations, *Scripta mathematica*, 11 (1945), p. 5-19.

- [13] BOYS (Charles Vernon), An integrating machine, *The Philosophical Magazine* (5), 11 (1881), p. 342-348 + pl. viii.
- [14] BOYS (Charles Vernon), On integrating and other apparatus for the measurement of mechanical and electrical forces, *The Philosophical Magazine* (5), 13 (1882), p. 77-95. Repr. in *Proceedings of the Physical Society*, 5 (1882-1884), p. 8-28, suivi de Apparatus for calculating efficiency, p. 28-35.
- [15] BREZINSKI (Claude) & TOURNÈS (Dominique), *André-Louis Cholesky, Mathematician, Topographer and Army Officer*, Basel : Birkhäuser, 2014.
- [16] BRIOIST (Pascal) & BRUNEAU (Alexandre), Les mathématiciens dans la cité : le cas des ingénieurs de la Renaissance, in *Les mathématiques dans la cité*, Marie-José Durand-Richard (éd.), Paris : Presses Universitaires de Vincennes, 2006, p. 23-44.
- [17] BUSH (Vannevar), GAGE (Frank Dana) & STEWART (Herbert R.), A continuous integrator, *Journal of The Franklin Institute*, 203 (1927), p. 63-84.
- [18] BUSH (Vannevar) & HAZEN (Harold Locke), Integrator solution of differential equations, *Journal of The Franklin Institute*, 204 (1927), p. 575-615.
- [19] BUSH (Vannevar), The differential analyzer. A new machine for solving differential equations, *Journal of The Franklin Institute*, 212 (1931), p. 447-488.
- [20] BUSH (Vannevar) & CALDWELL (Samuel Hawks), A new type of differential analyzer, *Journal of The Franklin Institute*, 240 (1945), p. 255-326.
- [21] CAUCHY (Augustin-Louis), BEAUMONT (Élie de) & LAMÉ (Gabriel), Rapport sur un Mémoire de M. Léon Lalanne, qui a pour objet la substitution de plans topographiques à des tables numériques à double entrée, *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences*, 17 (1843), p. 492-494.
- [22] CHATZIS (Konstantinos), Fabriquer et recevoir un cours magistral. Les cours de mécanique appliquée de J.-V. Poncelet à l'École de l'artillerie et du génie et à la Sorbonne, 1825-1848, *Histoire de l'éducation*, 120 (2008), p. 113-138.
- [23] CHATZIS (Konstantinos), Charles Dupin, Jean-Victor Poncelet et leurs mécaniques pour « artistes » et ouvriers, in *Charles Dupin (1784-1873) : ingénieur, savant, économiste, pédagogue et parlementaire du Premier au Second Empire*, Carole Christen & François Vatin (éds), Rennes : Presses universitaires de Rennes, 2009, p. 99-113.
- [24] COLLIGNON (Édouard-Charles-Romain), *Cours de mécanique appliquée aux constructions*, Paris : Dunod, 1869.
- [25] COUSINERY (Barthélémy-Édouard), *Le calcul par le trait, ses éléments et ses applications à la mesure des lignes, des surfaces et des cubes, à l'interpolation graphique et à la détermination, sur l'épure, de l'épaisseur des murs de soutènement et des murs de culées des voutes*, Paris : Carilian-Gœury & Dalmont, 1839.
- [26] COUSINERY (Barthélémy-Édouard), *Recueil de tables à l'usage des ingénieurs, faisant suite à l'ouvrage sous le même titre de R. Génieys, et formant le deuxième volume*, Paris : Carilian-Gœury & Dalmont, 1846.

- [27] CULMANN (Carl), *Die graphische Statik*, Zürich : Meyer & Zeller, 1864-1866 ; 2^e éd. refondue, vol. 1, 1875.
- [28] CULMANN (Carl), *Traité de statique graphique*, trad. de la 2^e éd. allemande par Georges Glasser, Jean Jacquier & Amédée Valat, Paris : Dunod, 1880.
- [29] DUFFIEUX (Pierre-Michel), *L'intégrale de Fourier et ses applications à l'optique*, Rennes : Oberthur, 1946 ; 2^e éd. Paris : Masson, 1970. Trad. angl., *The Fourier Transform and its Applications to Optics*, New York : Wiley, 1983.
- [30] DUPORCQ (Ernest), Sur la théorie des abaques à alignements, *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences*, 127 (1898), p. 265-268.
- [31] DUPONT (Jean-Yves), Évaluer la puissance des machines au XIX^e siècle, *La revue du Musée des arts et métiers*, 48 (2007), p. 43-54.
- [32] DURAND-RICHARD (Marie-José), Planimètres et intégraphes en Angleterre, http://irem.univ-reunion.fr/calculsavant/Textes/planimetres_angleterre.html.
- [33] DURAND-RICHARD (Marie-José), Planimeters and integragraphs in the 19th century. Before the differential analyser, *Nuncius. Journal of the History of Science*, 25 (2010), p. 101-124.
- [34] DURAND-RICHARD (Marie-José), De la prédiction des marées : entre calcul, observations et mécanisation (1831-1876), *Cahiers François Viète (2)*, 8-9 (2016), p. 105-135.
- [35] DURNOVÁ (Helena) & PAJU (Petri), Computing Close to the Iron Curtain : International Computing Practices in Czechoslovakia and Finland 1945-1970, *Comparative Technology Transfer and Society*, 7 (2009), p. 303-322.
- [36] ECKERT (Michael), A « kind of Olympic Games » : the Prandtl-Kármán rivalry of turbulent skin friction, *Conference on Fluid Resistance from Newton to the Present*, Paris : Université Pierre-et-Marie-Curie (UPMC), 2010, http://www.projets.upmc.fr/ashic/Colloque-in_duplicata_velocitatis/Videos/Mickael_Eckert_30-10-2010.htm.
- [37] EDDY (Henry Turner), *New constructions in graphical statics*, New York : Van Nostrand, 1877.
- [38] EDDY (Henry Turner), *Researches in graphical statics*, New York : Van Nostrand, 1878.
- [39] EDDY (Henry Turner), *Neue Konstruktionen aus der graphischen Statik*, Leipzig : Teubner, 1880. Repr., Whitefish (MT) : Kessinger Publishing LLC, 2010.
- [40] EIFFEL (Gustave), *Mémoire présenté à l'appui du projet définitif du viaduc de Garabit*, Paris : Baudry, 1889.
- [41] EVESHAM (Harold Ainsley), *The History and Development of Nomography*, Ph. D. Thesis, University of London, 1982. Repr., Boston (MA) : Docent Press, 2010.
- [42] EVESHAM (Harold Ainsley), Origins and development of nomography, *Annals of the History of Computing*, 8 (1986), p. 324-333.
- [43] FAVARO (Antonio), *Leçons de statique graphique. Première partie. Géométrie de position*, trad. de l'italien par Paul Terrier, Paris : Gauthier-Villars, 1879.

- [44] FAVARO (Antonio), *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.
- [45] FÉNOUX (Victor), Sur les navires faisant la navigation transatlantique à grande vitesse et sur les dispositions générales à adopter dans les ports qui reçoivent ces navires, *Annales des ponts et chaussées*, 18 (1869), p. 154-173, 201.
- [46] FISCHER (Charlotte Froese), *Douglas Rayner Hartree : his Life in Science and Computing*, Singapore : World Scientific, 2003.
- [47] FONTANON (Claudine), Un ingénieur militaire au service de l'industrialisation : Arthur-Jules Morin (1795-1880), *Cahiers d'histoire et de philosophie des sciences*, 29 (1990), p. 89-118.
- [48] FONTANON (Claudine) & FRANCK (Robert) (éds), *Paul Painlevé (1863-1933). Un savant en politique*, Rennes : Presses Universitaires de Rennes, 2005.
- [49] FONTANON (Claudine), L'obus Chilowski et la soufflerie balistique de Paul Langevin : un épisode oublié de la mobilisation scientifique (1915-1919), in *Deux siècles d'histoire de l'armement en France. De Gribeauval à la force de frappe*, Dominique Pestre (éd.), Paris : CNRS Éditions, 2005, p. 81-109.
- [50] FORBES (James David) & MAHLMANN (Wilhelm), *Abriss einer Geschichte der neueren Fortschritte und des gegenwärtigen Zustandes der Meteorologie*, Berlin : Lüderitz, 1836.
- [51] FUNKHOUSER (Howard Gray), Historical development of the graphical representation of statistical data, *Osiris*, 3 (1937), p. 269-404.
- [52] GISPERT (Hélène) (éd.), « *Par la science, pour la patrie* », un projet politique pour une société savante, *l'Association française pour l'avancement des sciences (1872-1914)*, Rennes : Presses universitaires de Rennes, 2002.
- [53] GOUZÉVITCH (Irina), GRELON (André) & KARVAR (Anousheh) (éds), *La formation des ingénieurs en perspective. Modèles de référence et réseaux de médiation, XVIII^e- XX^e siècles*, Rennes : Presses universitaires de Rennes, 2004.
- [54] GOUZÉVITCH (Irina), L'école des « 3B », ou les antécédents hispano-franco-écossais de l'école mécanico-mathématique russe, dite d'Ostrogradsky (1810-1830), in *Les mathématiques dans la cité*, Marie-José Durand-Richard (éd.), Paris : Presses Universitaires de Vincennes, 2006, p. 45-75.
- [55] GOUZÉVITCH (Irina) & GRELON (André), Reflexión sobre el ingeniero europeo en el siglo XIX : retos, problemáticas e historiografías, in *Técnica e ingeniería en España. Vol. IV : El Ochocientos. Pensamiento, profesiones y sociedad*, Manuel Silva Suárez (éd.), Zaragoza : Prensas Universitarias de Zaragoza, 2007, p. 269-321.
- [56] GRIGOROVICI (Radu) & MANAILA (Rodica), Structural model for amorphous germanium layers, *Thin Solid Films*, 1 (1968), p. 343-352.
- [57] HALL (Thomas Grainger), *The Elements of Descriptive Geometry : chiefly intended for students in engineering*, London : Parker, 1841.
- [58] HANKEL (Hermann), *Die Entwicklung der Mathematik in den letzten Jahrhunderten*, Tübingen : Fues, 1869.

- [59] HANKEL (Hermann), *Die Elemente der projectivischen Geometrie in synthetischer Behandlung*, Leipzig : Teubner, 1875.
- [60] HANKINS (Thomas Leroy), Blood, dirt, and nomograms. A particular history of graphs, *Isis*, 90 (1999), p. 50-80.
- [61] HARTREE (Douglas Rayner), Machine solves mathematical problems. A wonderful Meccano mechanism, *Meccano Magazine*, 19 (1934), n° 6, p. 442-444.
- [62] HARTREE (Douglas Rayner), PORTER (Arthur) & CALLENDER (Albert), Time-lag in a control system, *Philosophical Transactions of the Royal Society (A)*, 235 (1936), p. 415-444.
- [63] HARTREE (Douglas Rayner), The mechanical integration of differential equations, *The Mathematical Gazette*, 22 (1938), p. 342-363.
- [64] HARTREE (Douglas Rayner), The application of the differential analyser to the evaluation of solutions of partial differential equations, *Proceedings of the First Canadian Mathematical Congress (Montreal, 1945)*, Toronto : University of Toronto Press, 1946, p. 327.
- [65] HARTREE (Douglas Rayner), *Calculating Instruments and Machines*, Urbana : University of Illinois Press, 1949.
- [66] HAWKES (Peter) & BONNET (Noël), A symposium in honour of Pierre-Michel Duffieux, *Microscopy, Microanalysis, Microstructures*, 8 (1997), p. 9-14.
- [67] HAWKES (Peter), Recent advances in electron optics and electron microscopy, *Annales de la fondation Louis de Broglie*, 29 hors série 1 (2004), p. 837-855.
- [68] HELE SHAW (Henry Selby), Mechanical integrators, *Minutes of Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 82 (1885), p. 75-143.
- [69] HELE SHAW (Henry Selby), 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, in *Report of the Fifty-Ninth Meeting of the British Association for the Advancement of Science, held at Newcastle-upon-Tyne in September 1889*, London : Murray, 1890, p. 322-327.
- [70] HELE SHAW (Henry Selby), Second report on the development of graphic methods in mechanical science, in *Report of the Sixty-Second Meeting of the British Association for the Advancement of Science, held at Edinburgh in August 1892*, London : Murray, 1893, p. 373-531.
- [71] HELE SHAW (Henry Selby), The development of graphic methods in mechanical science. Third report, in *Report of the Sixty-Third Meeting of the British Association for the Advancement of Science, held at Nottingham in September 1893*, London : Murray, 1894, p. 573-613.
- [72] HENRICI (Olaus), Report on planimeters, in *Report of the Sixty-Fourth Meeting of the British Association for the Advancement of Science held at Oxford in August 1894*, London : Murray, 1894, p. 496-523.
- [73] ITARD (Jean), Ocagne, Philibert Maurice d', in *Dictionary of Scientific Biography*, Charles Coulston Gillispie (éd.), 18 vol., New York : Scribner, 1970-1990.

- [74] JENKIN (Fleeming), On the practical applications of reciprocal figures in the calculations of stains on framework, *Transactions of the Royal Society of Edinburgh*, 25 (1869), p. 441-447.
- [75] JOUKOVSKI (Nikolaï Iegorovitch), *Bases théoriques de l'aéronautique. Aérodynamique, cours professé à l'École impériale technique de Moscou*, trad. fr. par Stephan Drzewiecki, Paris : Gauthier-Villars, 1916 ; 2^e éd. revue et annotée par Wladimir Margoulis, 1931.
- [76] KÄMTZ (Ludwig Friedrich), *Cours complet de météorologie*, trad. de l'allemand et annoté par Charles Martins, avec un appendice contenant la représentation graphique des tableaux numériques, par Léon Lalanne, Paris : Paulin, 1843.
- [77] KHOVANSKI (Georgi Sergeevich), *Éléments de nomographie (en russe)*, Moscou, 1976. Trad. fr. de Djilali Embarek, Moscou : Mir, 1979.
- [78] KORSCHUNOW (Alex), On the reliability of harmonic analysis of seismograms, *Geophysical Prospecting*, 4 (2006), p. 303-309.
- [79] KNORR (Wilbur Richard), *The Ancient Tradition of Geometric Problems*, Boston-Basel-Stuttgart : Birkhäuser, 1986.
- [80] KROES (Peter) & BAKKER (Martijn), *Technological Development and Science in the Industrial Age. New Perspectives on the Science-Technology Relationship*, Dordrecht-Boston-London : Kluwer Academic Publishers, 1992.
- [81] KRYLOV (Aleksei Nikolaevich), On the hatchet planimeter, *Bulletin de l'Académie Impériale des Sciences de Saint-Pétersbourg*, 19 (1903), p. 1-7.
- [82] KRYLOV (Aleksei Nikolaevich), Sur un intégrateur des équations différentielles ordinaires, *Bulletin de l'Académie Impériale des Sciences de Saint-Pétersbourg*, 20 (1904), p. 1-21.
- [83] LALANNE (Léon-Louis), Mémoire sur la substitution de plans topographiques à des tables numériques à double entrée, sur un nouveau mode de transformation des coordonnées, et sur ses applications à ce système de tables topographiques, *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences*, 16 (1843), p. 1162-1164.
- [84] LALANNE (Léon-Louis), Remarques à l'occasion du mémoire de M. Morlet sur les centres de figures ; et réflexions sur la représentation graphique de divers éléments relatifs à la population, *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences*, 20 (1845), p. 438-441.
- [85] LALANNE (Léon-Louis), Sur les tables graphiques et sur la géométrie anamorphique appliquée à diverses questions qui se rattachent à l'art de l'ingénieur, *Annales des ponts et chaussées* (2), 11 (1846), p. 1-69 + pl. 98-101.
- [86] LALANNE (Léon-Louis), *Instruction pour l'usage de l'abaque des équivalents chimiques*, Paris, 1846 ; 2^e éd., *Abaque des équivalents chimiques pour faire suite à tous les traités de chimie*, Paris : Hachette, 1851.
- [87] LALANNE (Léon-Louis), Tables graphiques et géométrie anamorphique ; réclamation de priorité, *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences*, 185 (1877), p. 1012-1014, 1242-1243.

- [88] LALANNE (Léon-Louis), *Méthodes graphiques pour l'expression des lois empiriques ou mathématiques à trois variables avec des applications à l'art de l'ingénieur et à la résolution des équations numériques d'un degré quelconque*, Paris : Imprimerie nationale, 1878 ; 2^e éd. revue et corrigée, 1880.
- [89] LALLEMAND (Charles), *Les abaques hexagonaux. Nouvelle méthode de calcul graphique, avec de nombreux exemples d'applications*, Paris : Ministère des travaux publics, 1885.
- [90] LALLEMAND (Charles), Sur la genèse et l'état actuel de la science des abaques, *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences*, 174 (1922), p. 82-88.
- [91] LALLEMAND (Charles), Sur les avantages comparés des abaques hexagonaux et des abaques à points alignés, *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences*, 174 (1922), p. 253-258.
- [92] LALLEMAND (Charles), *Représentation graphique des formules à plusieurs variables. Abaques hexagonaux et abaques à points alignés*, Paris : Gauthier-Villars, 1922.
- [93] LANCHESTER (Frederik William), *Aerodynamics*, London : Constable, 1907. Trad. allem. par Carl, Aimée & Iris Runge, *Aerodynamik. Ein Gesamtwerk über das Fliegen*, Leipzig : Teubner, 1909.
- [94] LAWRENCE (Snezana), *Geometry of Architecture and Freemasonry in 19th century England*, Ph. D. Thesis, London : Open University, 2002.
- [95] LÉVY (Maurice), *La statique graphique et ses applications aux constructions*, Paris : Gauthier-Villars, 1874 ; 2^e éd., 4 vol. et 2 atlas, 1886-1888 ; 3^e éd., 4 vol. et 4 atlas, 1907-1926.
- [96] LÓPEZ NIETO (António), Nomogramas baricentricos, *Revista Matemática Hispano-Americana* (4), 11 (1951), p. 191-207.
- [97] LUBBOCK (John William), Researches in Physical Astronomy, *Philosophical Transactions of the Royal Society*, 121 (1831), p. 17-66, 231-298.
- [98] LUBBOCK (John William), On the tides of the port of London, *Philosophical Transactions of the Royal Society*, 121 (1831), p. 379-416.
- [99] LUBBOCK (John William), Researches in Physical Astronomy, *Philosophical Transactions of the Royal Society*, 122 (1832), p. 229-236, 361-368, 601-607.
- [100] LUBBOCK (John William), On the tides, *Philosophical Transactions of the Royal Society*, 122 (1832), p. 51-66.
- [101] LUBBOCK (John William), Notes on the tides, *Philosophical Transactions of the Royal Society*, 123 (1833), p. 19-22.
- [102] LUBBOCK (John William), On the tides, *Philosophical Transactions of the Royal Society*, 124 (1834), p. 143-166.
- [103] LUBBOCK (John William), Discussions of tide observations made at Liverpool, *Philosophical Transactions of the Royal Society*, 125 (1835), p. 275-279.
- [104] LUBBOCK (John William), Discussions of tide observations made at Liverpool, *Philosophical Transactions of the Royal Society*, 126 (1836), p. 57-73.

- [105] LUBBOCK (John William), The Bakerian Lecture : On the tides at the port of London, *Philosophical Transactions of the Royal Society*, 126 (1836), p. 217-266.
- [106] LUBBOCK (John William), On the tides, *Philosophical Transactions of the Royal Society*, 127 (1837), p. 97-140.
- [107] MALINOVSKIY (Boris Nikolayevich), Sergey Alexeevich Lebedev, in *Computing in Russia. The History of Computer Devices and Information Technology Revealed*, Georg Trogemann, Alexander Yuryevich Nitussov & Wolfgang Ernst (éds), Wiesbaden : Vieweg, 2004, p. 108-124.
- [108] MASSAU (Junius), Mémoire sur l'intégration graphique et ses applications, Livre III. Calcul d'un projet de route, *Annales de l'Association des ingénieurs sortis des écoles spéciales de Gand*, 7 (1884), p. 53-132 + pl. 4-8.
- [109] MASSAU (Junius), Mémoire sur l'intégration graphique et ses applications, Livre IV. Application à la stabilité des constructions en maçonnerie, *Annales de l'Association des ingénieurs sortis des écoles spéciales de Gand*, 10 (1887), p. 1-535 + pl. 1-7.
- [110] MAXWELL (James Clerk), Description of a new form of the platometer, an instrument for measuring the areas of plane figures drawn on paper, *Transactions of the Royal Scottish Society of Arts*, 7 (1855), p. 420-429.
- [111] MAXWELL (James Clerk), On reciprocal figures and diagrams of forces, *London, Edinburgh and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 27 (1864), p. 250-261.
- [112] MAXWELL (James Clerk), On reciprocal figures, frames, and diagrams of forces, *Transactions of the Royal Society of Edinburgh*, 26 (1870), p. 1-46.
- [113] MAXWELL (James Clerk), On Bow's method of drawing diagrams in graphical statics with illustrations from Peaucellier's linkage, *Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, 2 (1876), p. 407-414.
- [114] MAYER (Ursula), Beobachtungen der Richtungsszintillation, *Zeitschrift für Astrophysik*, 49 (1960), p. 161-167.
- [115] MEHMKE (Rudolf) & OCAGNE (Maurice d'), Calculs numériques, in *Encyclopédie des sciences mathématiques pures et appliquées*, Jules Molk (dir.), t. 1, vol. 4, Paris : Gauthier-Villars, 1909, p. 196-452 ; rééd., Paris : Gabay, 1993.
- [116] MERRIFIELD (Charles Watkins), Report on the present state of knowledge of the application of quadratures and interpolation to actual data, *Report of the Fiftieth Meeting of the British Association for the Advancement of Science held at Swansea in August and September 1880*, London : Murray, 1880, p. 321-378.
- [117] MONTI (Dominique), Les machines de Coradi pour le calcul des coefficients de Fourier, http://www.reunion.iufm.-fr/dep/mathematiques/calculsavant/Seminaires/instruments_2004.html.
- [118] MOREL (Thomas), *Mathématiques et politiques scientifiques en Saxe (1765-1861). Institutions, acteurs et enseignements*, thèse de doctorat de l'université de Bordeaux 1, 2013.
- [119] MOUNIER-KUHN (Pierre-Éric), *L'informatique en France de la Seconde Guerre mondiale au Plan Calcul. L'émergence d'une science*, Paris : Presses de l'Université Paris-Sorbonne, 2010.

- [120] MÜLLER-BRESLAU (Heinrich), *Elemente der graphischen Statik der Bauconstructionen für Architekten und Ingenieure*, 1 vol. + 1 atlas, Berlin : Seydel, 1881.
- [121] MÜLLER-BRESLAU (Heinrich), *Die Graphische Statik der Bauconstructionen*, 2 vol., Leipzig : Baumgärtner, 1885 ; 2^e éd., 1887-1992 ; 3^e éd., 1901-1903 ; 4^e éd., Stuttgart : Kröner, 1905-1907 ; 5^e éd., Leipzig : Kröner, 1912-1925 ; 6^e éd., 1927.
- [122] MÜLLER-BRESLAU (Heinrich), *Éléments de statique graphique appliquée aux constructions, 1^{re} partie : Poutres droites, poussées des terres, voûtes*, trad. de l'allemand, avec une 2^e partie : *Poutres continues. Applications numériques*, par Théophile Seyrig, Paris & Liège : Baudry, 1886.
- [123] MÜLLER-BRESLAU (Heinrich), *Die neueren Methoden der Festigkeitslehre und der Statik der Bauconstructionen, ausgehend von dem Gesetze der virtuellen Verschiebungen und den Lehrsätzen über die Formänderungsarbeit*, Leipzig : Baumgärtner, 1886 ; 2^e éd., 1893 ; 3^e éd., 1904 ; 4^e éd., Leipzig : Kröner, 1913 ; 5^e éd., 1924.
- [124] MÜLLER-BRESLAU (Heinrich), *La scienza delle costruzioni*, prima traduzione italiana sulla 5. ed. originale tedesca a cura di Carlo Rossi e Luigi Santarella, 5 vol., Milano : Hoepli, 1927.
- [125] OBENHEIM (Alexandre Magnus d'), *Balistique. Indication de quelques expériences propres à compléter la théorie du mouvement des projectiles de l'artillerie, précédée de l'analyse nécessaire*, Strasbourg : Levraut, 1814.
- [126] OBLONSKY (Jan G), Eloge : Antonin Svoboda, 1907-1980, *IEEE Annals of the History of Computing*, 2 (1980), p. 284-298.
- [127] OCAGNE (Maurice d'), Procédé nouveau de calcul graphique, *Annales des Ponts et Chaussées*, 8 (1884), p. 531-540.
- [128] OCAGNE (Maurice d'), *Coordonnées parallèles et axiales. Méthode de transformation géométrique et procédé nouveau de calcul graphique déduits de la considération des coordonnées parallèles*, Paris : Gauthier-Villars, 1885.
- [129] OCAGNE (Maurice d'), *Nomographie. Les calculs usuels effectués au moyen des abaques*, Paris : Gauthier-Villars, 1891.
- [130] OCAGNE (Maurice d'), *Le calcul simplifié par les procédés mécaniques et graphiques*, Paris : Gauthier-Villars, 1893 ; 2^e éd. entièrement refondue et considérablement augmentée, 1905 ; 3^e éd. avec une rédaction entièrement renouvelée et de nombreuses additions, 1928.
- [131] OCAGNE (Maurice d'), Description et indication du mode d'emploi de la machine arithmétique à mouvement continu de M. Tchebichef, *Annales du Conservatoire des arts et métiers* (2), 5 (1893), p. 231-269.
- [132] OCAGNE (Maurice d'), *Traité de nomographie. Théorie des abaques, applications pratiques*, Paris : Gauthier-Villars, 1899 ; *Traité de nomographie. Étude générale de la représentation graphique cotée des équations à un nombre quelconque de variables, applications pratiques*, 2^e éd. entièrement refondue, avec de nombreux compléments, 1921.
- [133] OCAGNE (Maurice d'), *Calcul graphique et nomographie*, Paris : Doin, 1908 ; 2^e éd. revue et corrigée, 1914 ; 3^e éd., 1924.

- [134] OCAGNE (Maurice d'), Sur la classification d'ensemble de tous les procédés de calcul dérivés de la géométrie et de la mécanique, *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences*, 182 (1926), p. 191-194.
- [135] PALMER (Henry), Description of a graphical registrar of tides and winds, *Philosophical Transactions of the Royal Society*, 121 (1831), p. 209-214.
- [136] PAQUIER (Serge), Les exemples contrastés de l'École d'ingénieurs de Lausanne et de l'École polytechnique fédérale de Zürich (1856-1914), in *La formation des ingénieurs en perspective. Modèles de référence et réseaux de médiation, XVIII^e-XX^e siècles*, Irina Gouzévitch, André Grelon & Anousheh Karvar (éds), Rennes : Presses universitaires de Rennes, 2004, p. 23-33.
- [137] PEREIRE (Eugène), *Tableaux sur les questions d'intérêts et d'assurances*, 3^e éd., Paris : Dupont, 1860.
- [138] PETITGIRARD (Loïc), *Le chaos : des questions théoriques aux enjeux sociaux*, thèse de doctorat de l'université Lumière-Lyon 2, 2004.
- [139] PICON (Antoine), *L'invention de l'ingénieur moderne : l'École des Ponts et Chaussées, 1747-1851*, Paris : Presses de l'École nationale des ponts et chaussées, 1992.
- [140] PIRANI (Marcello), *Graphische Darstellung in Wissenschaft und Technik*, 2^e éd. complétée par Iris Runge, Berlin : de Gruyter, 1931.
- [141] PITRAT (Jacques), La naissance de l'intelligence artificielle, in *La Recherche en intelligence artificielle*, Abdel Belaïd et al., Paris : Éditions du Seuil & La Recherche, 1987.
- [142] PORTER (Theodore M.), *Karl Pearson, the Scientific Life in a Statistical Age*, Princeton (NJ) : Princeton University Press, 2004.
- [143] POUCHET (Louis-Ézéchiél), *Tableau des nouveaux poids, mesures et monnoies de la République française, suivis des rapports qu'ils ont avec les plus connus de l'Europe comparés entre eux, d'après la Métrologie de Paucton et au moyen des lignes proportionnelles*, Rouen : l'auteur, an III (1794).
- [144] POUCHET (Louis-Ézéchiél), *Échelles graphiques des nouveaux poids, mesures et monnoies de la République française, et des villes et pays les plus commerçants de l'Europe. Seconde édition augmentée d'un Traité sur les changes, et d'un d'Arithmétique linéaire*, Rouen : Guédra & Paris : Barois, an IV (1795).
- [145] POUCHET (Louis-Ézéchiél), *Arithmétique linéaire, ou Nouvelle méthode abrégée de calculer, que l'on peut pratiquer sans savoir lire ni écrire*, Rouen : Guédra, an IV (1795).
- [146] POUCHET (Louis-Ézéchiél), *Métrologie terrestre, ou Tables des nouveaux poids, mesures et monnoies de France. Nouvelle édition considérablement augmentée*, Rouen : Guilbert & Herment, an V (1797).
- [147] RANKINE (William John Macquorn), *A Manual of Applied Mechanics*, London : Griffin, 1858. Trad. fr. de la 7^e éd. par Alfred Vialay, *Manuel de mécanique appliquée*, Paris : Dunod, 1876.

- [148] RANKINE (William John Macquorn), Principle of the equilibrium of polyhedral frames, *London, Edinburgh and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science* (4), 27 (1864), p. 92.
- [149] REYE (Theodor), *Die Geometrie der Lage*, 2 vol., Hannover : Rümpler, 1866-1868.
- [150] ROSHDI (Rashed), *Entre arithmétique et algèbre : recherches sur l'histoire des mathématiques arabes*, Paris : Les Belles Lettres, 1984.
- [151] RUNGE (Carl), *Graphical Methods*, New York : Columbia University Press, 1912. Trad. allem. par Carl Runge, *Graphische Methoden*, Leipzig : Teubner, 1915 ; 2^e éd., 1919 ; 3^e éd., 1928.
- [152] RUNGE (Iris), Die Beurteilung von Ausschußprozentsätzen nach Stichproben, *Zeitschrift für Physik*, 18 (1923), p. 228-231.
- [153] RUNGE (Iris), BECKER (Richard) & PLAUT (Hubert K.), *Anwendungen der mathematischen Statistik auf Probleme der Massenfabrikation*, Berlin : Springer, 1927.
- [154] SEGAL (Jérôme), *Le Zéro et le Un. Histoire de la notion scientifique d'information au 20^e siècle*, Paris : Syllepse, 2004 ; 2^e éd., 2011.
- [155] SHANNON (Claude Elwood), A mathematical theory of communication, *The Bell System Technical Journal*, 27 (1948), p. 379-423, 623-656.
- [156] SHANNON (Claude Elwood), Communication theory of secrecy systems, *The Bell System Technical Journal*, 28 (1949), p. 656-711.
- [157] SHEWHART (Walter Andrew), *Economic Control of Quality of Manufactured Products*, New York : Van Nostrand, 1931.
- [158] SOREAU (Rodolphe), Contribution à la théorie et aux applications de la nomographie, *Mémoires de la Société des ingénieurs civils de France*, 1901, p. 191-512.
- [159] SOREAU (Rodolphe), *Nomographie ou Traité des abaques*, 2 vol., Paris : Chiron, 1921.
- [160] STAUDT (Carl Georg Christian von), *Geometrie der Lage*, Nürnberg : Bauer & Raspe, 1847.
- [161] STEINER (Jakob), *Systematische Entwicklung der Abhängigkeit geometrischer Gestalten von einander*, Berlin : Fincke, 1832.
- [162] TERQUEM (Olry), *Mémorial de l'artillerie*, 3 (1830), p. 296-336.
- [163] TESTON (Bernard), Une petite histoire de l'analyse harmonique de la parole, in *Actes des Journées d'étude sur la parole (Mons, 25-28 mai 2010)*, Mons : Université de Mons Hainaut, 2010, p. 285-288.
- [164] THE INSTITUTION OF CIVIL ENGINEERS, Historical notice of the Institution and its Proceedings, *Minutes of Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 86 (1886), p. 153-164.
- [165] THOMSON (William), Report of the Committee for the purpose of promoting the extension, improvement, and harmonic analysis of tidal observations, *Report of the thirty-eighth meeting of the British Association for the Advancement of Science, held in Norwich in 1868*, London : Murray, 1869, p. 489-510.

- [166] THOMSON (William), An instrument for calculating $\int \Phi(x)\Psi(x)dx$, the integral of the product of two given functions, *Proceedings of the Royal Society*, 24 (1876), p. 266-268. Trad. fr. par Marie-José Durand-Richard, http://irem.univ-reunion.fr/calculsavant/Textes/anthologie_integration.html.
- [167] THOMSON (James), An integrating machine having a new kinematic principle, *Proceedings of the Royal Society*, 24 (1876), p. 262-265. Trad. fr. par Marie-José Durand-Richard, http://irem.univ-reunion.fr/calculsavant/Textes/anthologie_integration.html.
- [168] THOMSON (William), Mechanical integration of linear differential equations of the second order with variable coefficients, *Proceedings of the Royal Society*, 24 (1876), p. 269-271. Trad. fr. par Marie-José Durand-Richard, http://irem.univ-reunion.fr/calculsavant/Textes/anthologie_integration.html.
- [169] THOMSON (William), Mechanical integration of the general linear differential equation of any order with variable coefficients, *Proceedings of the Royal Society*, 24 (1876), p. 271-275.
- [170] THOMSON (William), Harmonic analyzer, *Proceedings of the Royal Society*, 27 (1878), p. 371-373. Trad. fr. par Marie-José Durand-Richard, http://irem.univ-reunion.fr/calculsavant/Textes/anthologie_integration.html.
- [171] THOMSON (William), The tidal gauge, tidal harmonic analyser, and tidal predictor, with discussion, *Minutes of the Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 65 (1880-81), p. 2-72 + fig. 1-11.
- [172] TOBIES (Renate), Mathematics for improving the construction of valves, in *Heinrich Hertz (1857-1894) and the Development of Communication*, Gudrun Wolfschmidt (éd.), Norderstedt : Books on Demand GmbH, 2008, p. 577-599.
- [173] TORRES QUEVEDO (Leonardo), Sur les machines à calculer, *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences*, 130 (1900), p. 472-474, 874-876.
- [174] TORRES QUEVEDO (Leonardo), Machines à calculer, *Mémoires présentés par divers savants à l'Académie des sciences de l'Institut national de France*, t. 32, n° 9, 1901, p. 1-20 + pl. 1-5.
- [175] TORRES QUEVEDO (Leonardo), Sur les rapports entre le calcul mécanique et le calcul graphique, *Bulletin de la Société mathématique de France*, 29 (1901), p. 161-167.
- [176] TOURNÈS (Dominique), Pour une histoire du calcul graphique, *Revue d'histoire des mathématiques*, 6 (2000), p. 127-161.
- [177] TOURNÈS (Dominique), Junius Massau et l'intégration graphique, *Revue d'histoire des mathématiques*, 9 (2003), p. 181-252.
- [178] TOURNÈS (Dominique), Les cours d'André-Louis Cholesky à l'École spéciale des travaux publics, du bâtiment et de l'industrie, in *Les ouvrages de mathématiques dans l'histoire*, Évelyne Barbin & Marc Moyon (éds), Limoges : Presses universitaires de Limoges, 2013, p. 319-332.

- [179] URCELAY (José María), Nomogramas romboidales, *Gaceta Matemática*, 3 (1951), p. 183-194.
- [180] VANDEGINSTE (Pierre), Sergei A. Lebedev, père de l'ordinateur soviétique, *La Recherche*, 375 (2004), p. 44-46.
- [181] VAUTHIER (Louis-Léger), Note sur une carte statistique figurant la répartition de la population de Paris, *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences*, 78 (1874), p. 264-267.
- [182] VIETORIS (Leopold), Zum Gebrauch des harmonischen Analysators von Mader-Ott, *Zeitschrift Angewandte Mathematik und Mechanik*, 31 (1951), p. 179-181.
- [183] WHEWELL (William), Essay towards a first approximation of a map of cotidal lines, *Philosophical Transactions of the Royal Society*, 123 (1833), p. 147-236.
- [184] WHEWELL (William), On the empirical laws of the tides in the port of London, with some reflections on the theory, *Philosophical Transactions of the Royal Society*, 124 (1834), p. 15-46.
- [185] WHEWELL (William), On the results of tide observations made in June 1834 at the Coast Guard Station in Great-Britain and Ireland, *Philosophical Transactions of the Royal Society*, 125 (1835), p. 83-90.
- [186] WHEWELL (William), Researches on the tides – 14th series – On the results of continued tide observations at several places on the British coasts, *Philosophical Transactions of the Royal Society*, 140 (1850), p. 227-234.
- [187] WILLIAMS (Michael R.), *A History of Computing Technology*, 2nd ed. revised, Los Alamitos (CA) : IEEE Computer Society Press, 1997.
- [188] ZARZYCKI (Jerzy), Étude des sels fondus par diffraction des rayons X aux températures élevées, *Journal de physique appliquée*, 18 (1957), p. 65-69.

