

premières décennies de son existence, l'École formera d'ailleurs de nombreux savants.

Au cours de la première moitié du XIX^e siècle, les deux principales puissances européennes, l'Angleterre et la France, vont exporter leurs modèles d'ingénieur respectifs dans leurs zones d'influence. Là où se fait sentir l'influence française, des écoles voient le jour ou sont réorganisées. En s'inspirant de la formation dispensée à l'École polytechnique et à l'École des ponts et chaussées, des ingénieurs d'État français contribuent par exemple à la mise sur pied de l'Institut des voies de communication de Saint-Petersbourg en 1809-1810. Le polytechnicien saint-simonien Charles Lambert dote quant à lui l'Égypte de Méhémet Ali de sa première école d'ingénieurs moderne au milieu des années 1830. Soumis à la fois aux influences anglaise et française, les États-Unis d'Amérique présentent une sorte de compromis. Tandis que le modèle anglais prévaut chez les premiers ingénieurs civils américains, formés généralement sur le tas en dépit de l'existence d'établissements comme la Rensselaer School, fondée en 1824, le modèle français s'impose aux ingénieurs militaires qu'accueille West Point.

Avec la première révolution industrielle, l'écart qui sépare ces deux modèles va s'atténuer quelque peu. Côté français, des ingénieurs civils s'inspirant de l'exemple anglais vont côtoyer des ingénieurs d'État. Ces ingénieurs se forment dans des établissements comme les écoles d'arts et métiers, apparues à la charnière des XVIII^e et XIX^e siècles, ou l'École centrale des arts et manufactures, fondée en 1829, dont les programmes prennent leurs distances à l'égard du cursus polytechnicien, jugé beaucoup trop théorique pour répondre aux besoins des industriels. En Angleterre, l'apprentissage cède progressivement du terrain au profit de formations dispensées par des établissements comme l'University College ou le King's College de Londres. De nombreuses écoles vont être créées par la suite outre-Manche, à commencer par le Royal College of Chemistry et la Royal School of Mines en 1845 et 1851.

La sophistication croissante des techniques rend ce processus de scolarisation inéluctable. De la Russie aux États-Unis d'Amérique, les établissements d'enseignement destinés aux ingénieurs se multiplient. On assiste parallèlement à une diversification des matières enseignées, rendue nécessaire par le développement de nouveaux domaines comme la construction

mécanique ou la chimie. Cette diversification est particulièrement sensible dans les programmes de l'École polytechnique de Zurich, fondée en 1855, ou dans ceux du Massachusetts Institute of Technology, ouvert en 1865 à Boston. Dans les dernières décennies du XIX^e siècle, la cascade d'innovations qui précèdent la seconde révolution industrielle, et qui vont conduire à l'utilisation massive de l'électricité et à la diffusion des moteurs thermiques, entraîne une nouvelle vague de créations, encore plus importantes que les précédentes. À côté d'établissements généralistes, on voit apparaître toute une série d'établissements spécialisés, à l'instar de l'École supérieure d'électricité de Malakoff, qui est fondée en 1894. Particulièrement nombreuses dans des secteurs comme le génie mécanique, le génie électrique ou le génie chimique, ces créations témoignent du déclin relatif du génie civil et de la construction au sein du monde des ingénieurs.

Après s'être progressivement constitué, un nouveau modèle de formation se diffuse vers la même époque : celui des Technische Hochschulen allemandes. Aux yeux de ses promoteurs, ce système permet de dépasser le clivage entre formation universitaire et formation à finalité professionnelle, qui avait constitué jusque-là un frein au développement de l'enseignement technique supérieur dans de nombreux pays. Cherchant à concilier les exigences de la théorie avec les besoins de la pratique, jouant assez systématiquement la carte de la recherche, le modèle allemand exerce une forte influence un peu partout en Europe et en Amérique du Nord. Cette influence est évidente dans le cas de la Suisse et d'établissements comme l'École polytechnique de Zurich, mais aussi en Belgique, en Hollande ou en Suède. Quoique plus diffuse aux États-Unis, elle va jouer notamment un rôle dans la création de nombreux départements d'ingénierie au sein des universités, ainsi que dans la stratégie de recherche mise sur pied par certains établissements.

Le XX^e siècle enregistre une croissance sans précédent du nombre des ingénieurs et de celui des formations qui leur sont proposées. Tandis que l'on recensait par exemple 45 000 ingénieurs aux États-Unis en 1900, leur nombre s'élève déjà à 230 000 en 1930. Cette explosion démographique voit les différences entre systèmes d'enseignement nationaux s'estomper progressivement, même si la part des mathématiques

demeure plus importante dans un pays comme la France qu'en Angleterre ou aux États-Unis. Les mêmes problèmes se posent désormais d'un continent à l'autre. Certains d'entre eux sont anciens, comme la difficulté de concilier l'apprentissage des sciences avec le maintien d'une pratique de projet indispensable dans des domaines comme le génie civil et la construction. D'autres sont apparus plus récemment, comme la nécessité d'accorder une place grandissante aux humanités, aux sciences sociales et au droit, afin de préparer les futurs ingénieurs à des situations de plus en plus complexes. Jusqu'à quel stade peut-on spécialiser les études ? Où passe la ligne de partage entre têtes bien faites et têtes bien pleines ? Comment associer véritablement recherche et enseignement ? Toutes ces questions n'ont pas fini de hanter ceux qui ont pour mission de former des ingénieurs, ces hybrides de science et d'action qu'aucune formule ne permet de définir en toute généralité. A. P.

VOIR AUSSI Architectes et ingénieurs ; Profession d'ingénieur.

Forth (pont sur le)

Près d'Édimbourg, Écosse, Grande-Bretagne, 1890.

Le pont de chemin de fer du Forth est le premier grand pont d'acier du monde. La portée gigantesque de ses poutres de 521 m, supérieure à celle des plus grands ponts suspendus de l'époque, en fait un exploit technique. Situé à 14 km au sud-ouest d'Édimbourg, le pont franchit le Forth entre les Queensferry nord et sud, et constitue une artère vitale du réseau ferré de la côte est. Il est officiellement ouvert le 4 mars 1890 avec la pose d'un « rivet d'or » par le prince de Galles.

Cet ouvrage de 2,5 km de long a été conçu par sir John Fowler et sir Benjamin Baker et construit par Tancred, Arrol & Co. Sir Thomas Bouch avait déjà projeté un pont suspendu sur le Forth, dont les travaux avaient commencé puis été abandonnés à la suite de l'effondrement du pont de Tay. Fowler et Baker, estimant que ce projet n'était pas approprié à l'usage ferroviaire réservé au pont, en proposent alors un autre. Ils conçoivent, pour un coût estimé au double de celui du pont de Bouch, une structure rigide très résistante, constituée de tubes rivetés et de nœuds, et comportant 3 éléments en porte-à-faux équilibrés et 2 travées suspendues, avec 2 travées d'accès en poutres-trellis.



THE FORTH BRIDGE
INCORPORATING FOUR HUNDRED OF THE
APRIL 1913 - NO. 250

Pont sur le Forth, vue de la construction.

L'ouvrage, d'un coût global de plus de 3 millions de livres sterling, a nécessité une main-d'œuvre considérable, requérant parfois jusqu'à 400 ouvriers. Des bateaux de sauvetage étaient stationnés sous chaque porte-à-faux, pour parer aux accidents, ce qui a permis de sauver 8 personnes. En dépit de cela, 57 hommes ont péri au cours de la construction.

Chaque élément en console, ou cantilever, repose sur 4 piliers circulaires de maçonnerie à parement en granit d'Aberdeen recouvrant une maçonnerie de béton et de moellons; ces piliers ont été construits à l'intérieur de caissons en fonte fondés dans l'argile à blocs ou sur la roche basaltique. Les éléments en double porte-à-faux qui constituent l'ossature principale du pont sont connus sous les noms de cantilevers Queensferry, Inchgarvie et Fife. Les extrémités des cantilevers Queensferry et Fife vers les rives ne reposent pas sur les viaducs d'accès et n'y sont pas non plus fixées. Ces cantilevers portent des contrepoids de 1 016 t chacun, qui équilibrent la moitié du poids d'une des travées centrales suspendues (de 105 m) et de leur charge dynamique. La hauteur du pont, du niveau de l'eau à la partie supérieure des cantilevers, est de 110 m – la voie ferrée passant à 48 m, afin de laisser une hauteur libre de 46 m pour la navigation. On peut se faire une idée de l'échelle de masse de l'ouvrage à partir des quantités de matériaux employées: 6 500 000 rivets à pause hydraulique; 55 000 t d'acier; 20 950 m³ de maçonnerie de granit; 36 780 m³ de pierre ordinaire; 49 200 m³ de béton; plus de 21 350 t de ciment. Les travaux de peinture des 58 ha de superficie du pont, auxquels il est nécessaire de procéder tous les vingt-cinq ans, représentent un défi auquel doit continuellement faire face le propriétaire actuel, Railtrack Plc. R. A. P.

Fortifications

« Ingénieur: officier qui sert à la guerre pour les attaques, défenses et fortifications des places. »

Ainsi s'ouvre la définition du terme « ingénieur » donnée par le *Dictionnaire* de Furetière en 1727. Quoique réductrice, puisque qu'il existe déjà de nombreux ingénieurs civils au moment où paraît l'ouvrage, cette définition n'en est pas moins révélatrice du rôle essentiel joué par la fortification dans la genèse et le développement de la profession d'ingénieur.

La fortification moderne ou « bastionnée » naît en Italie au xvi^e siècle, avant de se répandre dans le reste de l'Europe. Conséquence des progrès de l'artillerie, elle se caractérise par l'emploi de massifs de terre qui viennent remplacer les enceintes de pierre du Moyen Âge afin d'amortir l'impact des projectiles, ainsi que par des avancées pentagonales, les bastions, qui permettent un meilleur flanquement des parties d'ouvrages. En 1600, ses principes sont déjà suffisamment formalisés pour qu'un Jean Errard de Bar-le-Duc puisse leur consacrer sa *Fortification démontrée et réduite en art*. Grâce aux perfectionnements notables que vont lui apporter de grands ingénieurs comme Sébastien Le Prestre (1633-1707), plus connu sous le nom de Vauban, le système bastionné va se maintenir jusque dans la première moitié du xix^e siècle.

C'est ce système qui permet à des États comme la France de contenir des menaces tant extérieures qu'intérieures au moyen d'un réseau de places fortes et de citadelles, véritable armature territoriale dont sont bientôt chargés des ingénieurs recrutés pour le compte du roi. En France, ces ingénieurs sont les premiers à se voir conférer un statut clairement défini;

ancêtre de tous les corps techniques de l'État, le corps des ingénieurs des fortifications reçoit sa première organisation en 1691. Dans de nombreux autres pays européens, de l'Espagne à la Russie, les ingénieurs du génie militaire précèdent également les ingénieurs civils.

Véritable matrice de la profession d'ingénieur, la fortification bastionnée fait aussi figure de laboratoire de la pensée rationnelle. En effet, le dimensionnement des différentes parties d'ouvrages s'opère au croisement de la géométrie et de considérations mécaniques et balistiques qui font du génie militaire l'un des premiers domaines techniques ayant systématiquement recours à la science et au calcul. De nombreux ingénieurs militaires vont d'ailleurs laisser un nom dans les annales des sciences pures et appliquées. Si la contribution de Vauban à l'étude de la poussée des terres demeure modeste, celle d'un Charles-Augustin Coulomb (1736-1806) se révèle en revanche décisive. À côté de son analyse de la poussée des terres, Coulomb renouvelle la théorie des voûtes avant de se consacrer à l'étude des phénomènes électrostatiques. À la veille de la Révolution, qui lui permettra de démontrer ses talents d'organisateur, Lazare Carnot (1753-1823) compte quant à lui parmi les pionniers de la science des machines. Cette brillante tradition se perpétuera au siècle suivant grâce à des savants de premier plan comme Sadi Carnot (1796-1832), l'un des fils de Lazare, ou Jean-Victor Poncelet (1788-1867).

Avec le développement de l'ingénierie civile et les progrès accélérés enregistrés par l'artillerie au cours de la seconde moitié du xix^e siècle, l'importance de la fortification décline cependant. Mais ce déclin s'avère relatif puisqu'un pays comme la France continue de consacrer des sommes importantes à la construction d'enceintes urbaines et de forts. L'abandon progressif du système bastionné a toutefois pour conséquence de rendre les principes de l'art plus incertains. Aux considérations géométriques d'antan, se substituent des expériences sur la résistance des bétons et des blindages qui contribuent aux progrès des sciences de l'ingénieur, sans toutefois déboucher sur des systèmes durables. Avec l'âge industriel, la fortification entre dans une ère d'expérimentations incessantes et d'échecs cuisants, comme le contournement de la ligne Maginot, qui la feront souvent critiquer, voire taxer d'impuissance, par les stratèges. Bien qu'elle incarne surtout les origines de l'ingénierie moderne et contemporaine, la fortification conserve



Pont sur le Forth.

Translation to English

Forth Bridge

Near Edinburgh, Scotland, Great Britain, 1890

The Forth Railway Bridge, the world's first major steel bridge, with its gigantic girder spans of 1710 ft (521 m) exceeding even the largest suspension bridge spans of its time, ranks as one of the great feats of civilisation. The bridge lies 14 km WSW of Edinburgh. Scotland. It straddles the Forth between North and South Queensferry and forms a vital artery in the east coast railway system. Construction commenced in 1883 and the bridge was formally opened on 4 March 1890 when HRH the Prince of Wales tapped a 'golden' rivet into place.

The 2.5 km long bridge was designed by Sir John Fowler and Sir Benjamin Baker and constructed by Messrs Tancred, Arrol & Co. Its designers considered Sir Thomas Bouch's Forth suspension bridge, upon which work had already begun but had been abandoned following the Tay Bridge failure, to be inappropriate for railway use. They rested, at more than twice the estimated cost of Bouch's bridge, a strong rigid design of riveted tube and tie construction consisting of three balanced cantilevers and two suspended spans, with lattice girder approach spans. The work, which cost over £3m, was labour intensive with 4000 men employed at times. In order to minimise the severity of accidents, rescue boats were stationed beneath each cantilever saving at least eight lives and recovering about 8000 caps! Nevertheless, 57 men lost their lives during construction.

Each cantilever is supported on four circular masonry piers faced with Aberdeen granite backed with concrete and rubble masonry which were built within cast iron caissons founded in boulder clay or on whinstone. The double-cantilevers forming the main feature of the bridge are known as the Queensferry, Inchgarvie and Fife cantilevers. The shoreward ends of the Queensferry and Fife cantilevers do not rest on, nor are they fixed to, the approach viaducts.

At each of their extremities there are counter-balance weights of 1,000 tons (1016 tonnes), which balance half the weight of one of the 346 ft (105 m) suspended central spans plus its live load.

The height of the bridge from high water level to the top of the cantilevers is 361 ft (110 m) with the railway at 158 ft (48.1 m) to allow 150 ft (46 m) clearance for shipping. An idea of the massive scale of the work can be obtained from the quantities of material employed, which, in addition to 6,500,000 hydraulically driven rivets, were:

Steel	54,160 tons (55,000 tonnes)
Granite masonry	740,000 cu. ft. (20,950 cu. m)
Ordinary stone	48,400 cu. yds. (36,780 cu. m).
Concrete	64,300 cu. yds. (49,200 cu. m.)
Cement	21,000+ tons (21,350+ tonnes)

Painting of the bridge's 145 acres (58 ha) of surface to a new specification with a 25 year life is a continuing challenge which is currently exercising its present owners Railtrack plc.