

Regard sur le passé de la géotechnique

J.-L. BORDES

20, rue de Madrid
75008 Paris

Résumé

Dans l'esprit d'une rétrospective propre à la fin du siècle, on s'est proposé de regarder l'histoire de la géotechnique, bien connue par ailleurs, en considérant tout spécialement l'évolution de ses pratiques expérimentales et de la notion de laboratoire depuis le XVIII^e jusqu'à la première moitié du XX^e siècle. La relation de leur développement avec les progrès des connaissances, et l'amélioration des procédés de construction, est tout particulièrement soulignée. En même temps, on a mis en évidence l'ancienneté et l'importance de l'augmentation des moyens de diffusion du savoir, livres et publications, sociétés savantes, des différents modes de transferts technologiques au nombre desquels les voyages et les congrès, tous d'autant plus efficaces que la formation initiale des hommes par l'école a été bien faite.

Looking back over the history of geotechnics

Abstract

As befits the end of the millennium, we take a look back over the history of geotechnics. In general terms its history is known, but we focus here on the evolution of experimental practice and the very notion of laboratories from the 18th century through to the middle of the 20th. Particular stress is put on the relationship between their development as knowledge improved and the improvement of construction methods. In so doing, we also underscore the importance – and indeed the very age of the practice – of making knowledge more widely available, through books, magazines, and learned societies, and of the different methods of transferring technological know-how, through trips and conferences. All these methods of enhancing knowledge have always derived the greatest benefit from the soundest basic academic grounding.

NDLE : Les discussions sur cet article sont acceptées dans un délai de trois mois après sa parution.

Introduction

S'intéresser au passé de la géotechnique, alors qu'il s'agit de célébrer le passage d'un millénaire à un autre, et d'esquisser à cette occasion des perspectives de progrès et de développement peut paraître paradoxal. Il n'en est rien, l'avenir ne prend toute sa signification qu'à la lumière du passé. Pour savoir où aller, encore faut-il connaître où l'on est, et d'où l'on vient. Nous nous proposons de rappeler brièvement ces origines, en insistant sur quelques faits en rapport avec la situation présente et celle que nous pouvons imaginer pour l'avenir.

L'ensemble des disciplines constituant le génie civil a été élaboré à partir du XVIII^e siècle, mais la mécanique des sols n'a été constituée en discipline à part entière qu'à partir des travaux de K. Terzaghi dans les années 20, et pleinement reconnue que depuis son premier congrès international tenu aux USA, à Cambridge, en 1936.

Il s'était pourtant passé beaucoup de choses avant. Les hommes avaient utilisé la terre comme support de leurs constructions ou comme matériaux constituant ces mêmes constructions avec ou sans addition d'autres matériaux tels que la pierre ou le bois, depuis des millénaires. Mais la modélisation du comportement de ces structures n'a guère commencé qu'au XVIII^e siècle, et il est d'usage de considérer que le mémoire de Coulomb est le document qui marque le début d'un processus de conceptualisation du comportement des sols qui continue sous nos yeux.

Cette histoire a déjà fait l'objet de publications nombreuses⁽¹⁾. Aussi nous souhaiterions ne pas recommencer un récit qui a été très bien fait par d'autres, et que nous utiliserons abondamment dans la suite de cet exposé.

Il nous a semblé intéressant de relire cette histoire en considérant celle des essais en place et en laboratoire et de l'observation des ouvrages, de façon à mettre en évidence leur articulation avec les méthodes de calculs qui traduisaient en langage mathématique les modélisations du comportement des structures. À cette histoire, nous rajoutons celle de la diffusion des connaissances, entre les différentes communautés techniques.

Si on laisse de côté toute la période de l'Antiquité, du Moyen Age et de la Renaissance, en suivant l'analyse qui en a été faite par Skempton, on peut distinguer quatre périodes, auxquelles nous ajouterons celle qui couvre le XX^e siècle après les travaux de Terzaghi :

(i) la période préclassique coïncidant avec le XVIII^e siècle ;

(ii) la première phase de la mécanique des sols classique inaugurée par Coulomb en 1774 ;

(iii) la seconde phase à partir des travaux de Darcy en 1856 ;

(iv) la première phase de la mécanique des sols moderne (1910-1927), à partir des travaux d'Atterberg ;

(v) la deuxième phase de la mécanique des sols modernes à partir des résultats des travaux de Terzaghi, qui s'étend jusqu'à nos jours.

Or, chacune de ces périodes a été marquée par d'importants travaux expérimentaux qui ont précédé ou accompagné l'élaboration des théories qui constituaient les outils nécessaires aux ingénieurs dans leur travail de conception et de réalisation des ouvrages. Aussi suivra-t-on la mise en place des pratiques et des structures d'études et de recherche qui, au fur et à mesure de l'avancement des connaissances, ont permis le recueil des mesures et observations sans lesquelles aucun progrès n'était possible.

En parallèle avec la division proposée par Skempton, on distinguera un temps d'avant les laboratoires qui couvre à peu près les deux premières parties, celle des laboratoires d'étude des matériaux qui comprend les deux parties suivantes, et enfin une troisième période qui commence après les travaux de Terzaghi. Par laboratoire, nous entendons la structure dans le sens le plus large du terme, dans laquelle peut se développer l'ensemble des pratiques expérimentales qui comprennent les essais sur échantillon, les essais sur modèle, les essais *in situ*, ainsi que le recueil des observations sur le comportement des ouvrages ou parties d'ouvrages.

Le temps d'avant les laboratoires (jusqu'au milieu du XIX^e siècle)

Ce temps englobe à la fois celui de la période préclassique et de la première phase de la mécanique des sols classique. La période préclassique couvre la plus grande partie du XVIII^e siècle. Elle ne faisait que continuer le siècle précédent par bien des aspects. Au cours de cette période, furent élaborées des théories empiriques sur la poussée des terres, fondées sur l'observation. Fixer un commencement est toujours délicat. Il en est ainsi de la première phase de la mécanique des sols classiques. Celui dont la postérité retient le nom, sans vouloir en diminuer les mérites, s'inscrit dans la continuité de l'accumulation d'un savoir auquel il va faire faire un bond à partir d'une analyse et d'une synthèse qu'il ne doit qu'à son talent, voire son génie. Mais la période à laquelle il intervient, l'urgence des progrès à faire, les conditions économiques et sociales de son époque, le matériau accumulé par ses prédécesseurs ne sont pas non plus indifférents à sa réussite.

C'est le cas du mémoire de Coulomb (1736-1806)⁽²⁾, qui n'a pas surgi du néant mais qui a été nourri d'un ensemble d'observations, d'essais et d'hypothèses, pour lesquels il faut citer les noms de Vauban (1633-

⁽¹⁾ On se reportera tout particulièrement aux comptes rendus du 11^e Congrès international de mécanique des sols et des travaux de fondations à San Francisco, tenu du 12 au 16 août 1985. Le volume du Jubilé sous le titre, *Le génie géotechnique, des origines à nos jours*, rassemble les textes des conférences prononcées par Jean Kérisel sur « l'histoire de l'ingénierie géomécanique jusqu'à 1700 », A.W. Skempton sur « l'évolution de la connaissance des sols de 1717 à 1927 », Ralph B. Peck sur « les soixante dernières années ».

Quatre autres publications sont à mentionner : Habib P. – « Histoire de la mécanique des sols ». *Cahiers de rhéologie*, mars 1991.

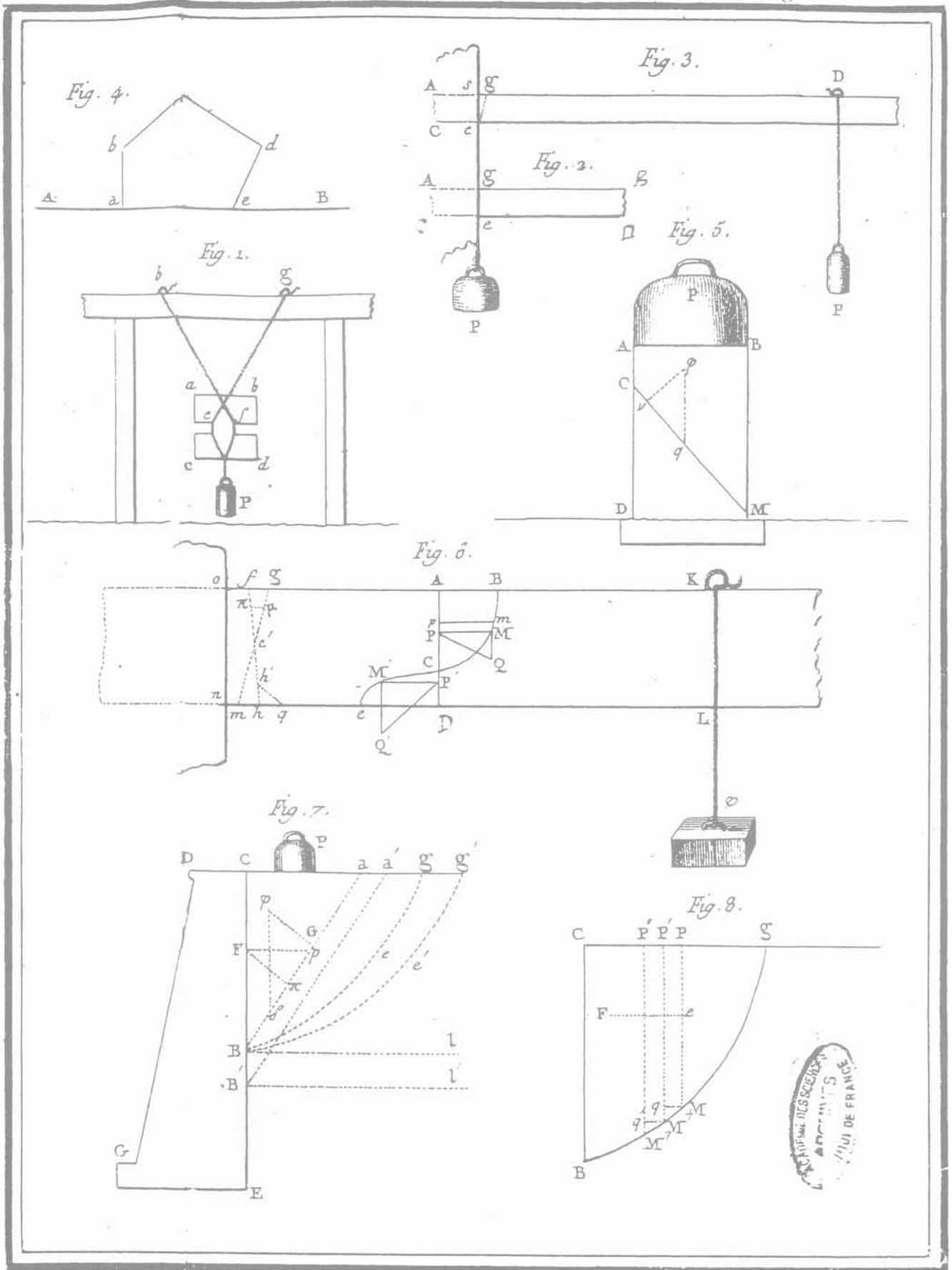
Kérisel J. – « Historique de la mécanique des sols en France jusqu'au XX^e siècle ». *Géotechnique*, vol. 6, 1956.

Skempton A.W. – « Landmarks in early soil mechanics ». *Proceedings 7th European conference on soils mechanics*, Brighton, 1979.

Timoshenko S.P. – *History of strength of materials*. New York Mc Graw Hill, 1953. Réédité depuis 1982 par Dover publications, inc, New York.

⁽²⁾ Coulomb C.A. – *Essai sur une application des règles de maximis et minimis, à quelques problèmes de statique, relatifs à l'architecture*. Mémoire des savants étrangers, Académie royale des sciences, vol. 7, Paris, 1776 (pour 1773).

Voir aussi : Heyman J. – *Coulomb's memoir on statics*. Cambridge University press, 1972.



C^{te} Toussard Sculp.

FIG. 1 Première planche illustrant le mémoire de Coulomb (bibliothèque de l'Académie des sciences).
Coulomb's memoir.

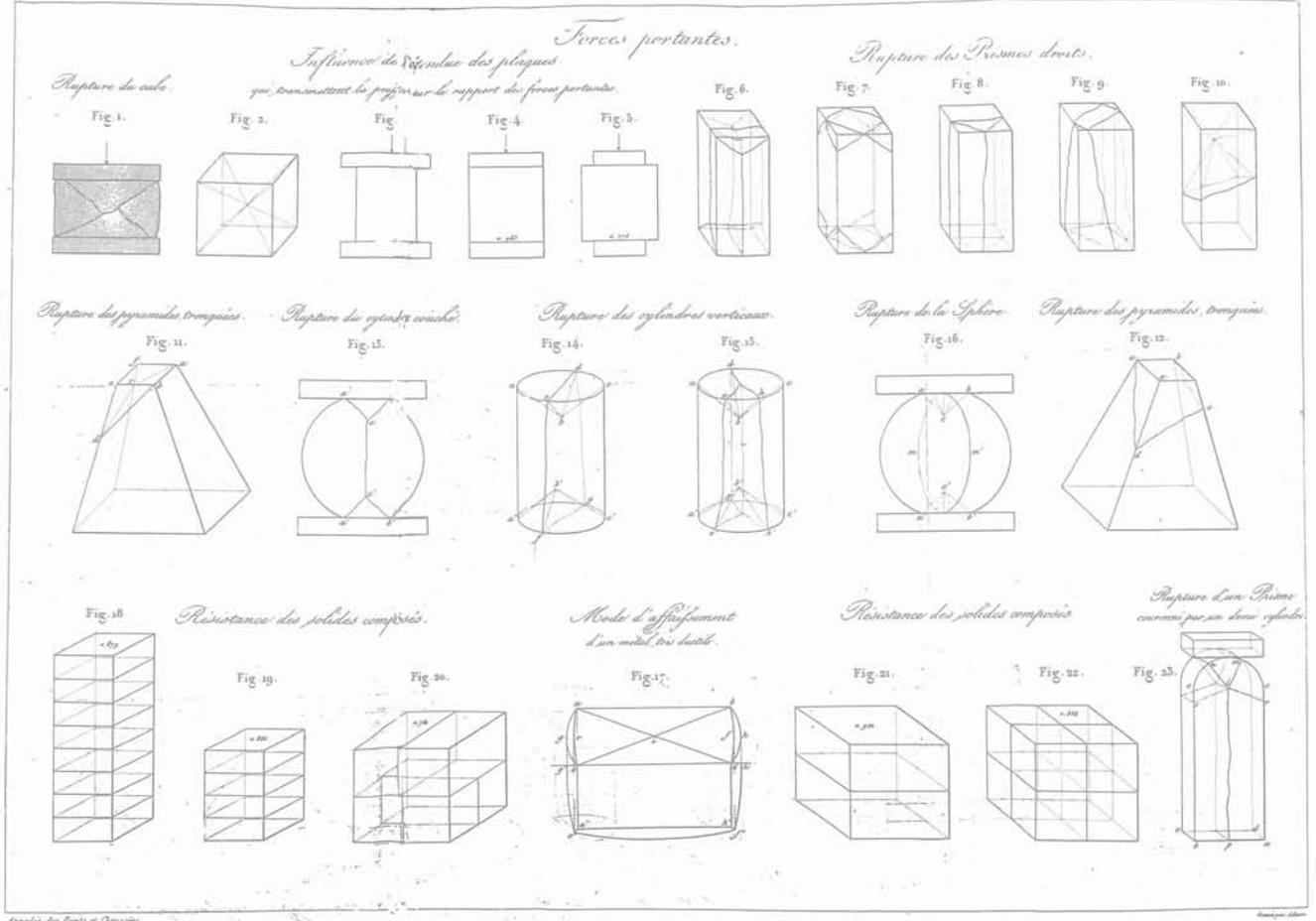


FIG. 2 Conditions de rupture d'éprouvettes de différentes formes.
Conditions of failure of specimens of various shapes.

1707), Gauthier (1660-1737), Belidor (1694-1761), Gadroy (1705-1759), Perronet (1708-1794), et de l'abbé Bossut (1730-1814), qui fit des essais sur le frottement et la cohésion et fut le professeur de Coulomb à l'École du génie à Mézières. Les notions de prisme de poussée, de talus naturel étaient le fruit d'analyse et de réflexion antérieure. Il n'est pas non plus indifférent que, dès les premières pages de son mémoire, Coulomb se réfère à des essais sur le frottement, faits par Amontons (1663-1705), rende compte d'essais de mesure sur la cohésion à partir de la rupture de différentes éprouvettes de matériau fait par lui-même (Fig. 1), ou sur un pilier carré par Musschenbroëk (1692-1761). Son analyse s'enracinait dans une approche expérimentale qui était la règle à l'époque. L'importance du mémoire de Coulomb qui dépassait la seule mécanique des sols, mais qui apportait des éléments de réflexion essentiels aussi bien au calcul des voûtes qu'à celle des poutres, était telle qu'il fallut plusieurs dizaines d'années pour qu'il fût assimilé.

À la suite de Coulomb, Prony (1755-1839), par une analyse complémentaire, contribuait à la diffusion de l'apport de Coulomb et à son acceptation en France. Mayniel (1760-1809) réalisait des essais sur modèle de 1,5 m de haut, Français (1775-1833) introduisait dans le calcul cohésion et fruit du mur de soutènement. Poncelet (1788-1867) établissait les calculs avec talus et mur inclinés, frottement sur le mur et introduisit la notation ϕ . Navier (1775-1833) donnait des valeurs de l'angle

de frottement de matériau pulvérulent et des observations sur la tenue des talus en argile. En parallèle, ces mêmes ingénieurs s'intéressaient à la mesure de la résistance mécanique de matériau comme la pierre pour la caractériser en vue du choix des matériaux les plus aptes suivant leur utilisation.

E.-M. Gauthey (1732-1806), dans la tradition des ingénieurs du XVIII^e siècle, dont il est un des plus brillants représentants, qui s'intéressaient essentiellement aux propriétés à la rupture des matériaux de construction, construisit une machine pour écraser des échantillons. Il fit une série d'essais pour le choix des pierres à employer dans les ponts ou dans des constructions exceptionnelles comme le Panthéon.

Vicat (1786-1861) dans un volumineux article⁽³⁾ en date de 1833, rendait compte d'essais à la rupture d'échantillons de nombreux matériaux, dans lesquels il essayait de déterminer l'influence de la forme des échantillons, le temps d'application de la charge, définissant par la même occasion les résistances instantanée et différée du matériau (Fig. 2). Il s'appuyait sur la définition de la résistance à la traction ou à l'arrachement, la résistance à la compression ou force portante du matériau, et enfin la ténacité ou force transverse

⁽³⁾ Vicat L.J. - « Recherches expérimentales sur les phénomènes physiques qui précèdent et accompagnent la rupture ou l'affaissement d'une certaine classe de solide ». *Annales des ponts et chaussées*, 2^e semestre 1833.

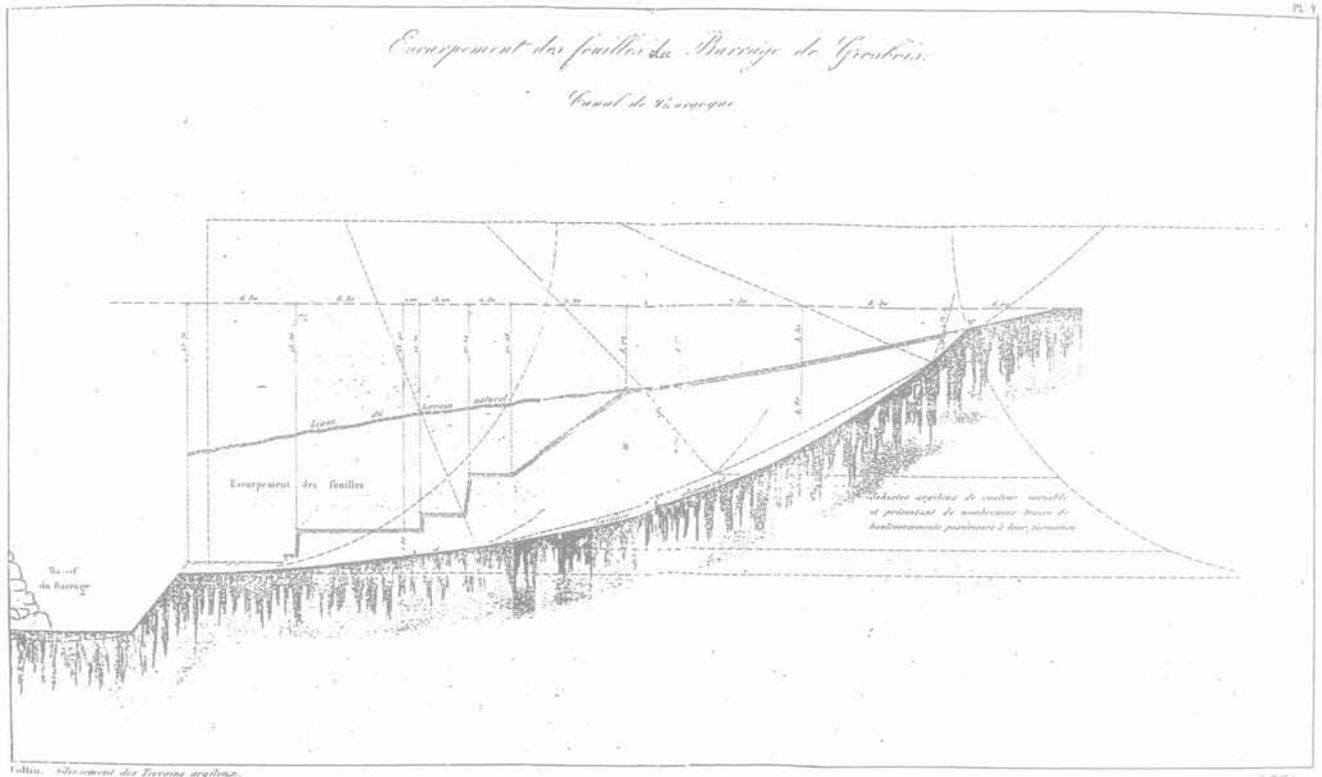


FIG. 3 Relevé du glissement survenu en rive droite du barrage de Grosbois.
Survey of slide in right bank of Grosbois dam.

dans laquelle intervenait la notion de cohésion de Coulomb. La notion de ténacité appelée à disparaître, était apparue avec Lemaire (1737). On peut, à la lecture de certaines pages du mémoire de Vicat, y voir l'ébauche de la notion de loi du matériau.

Ces pratiques s'inscrivaient dans une démarche expérimentale qui, par déduction, a permis de bâtir des modèles qui ont été par la suite traduits en langage mathématique. C'était celles des ingénieurs savants du XVIII^e siècle qui partant de problèmes très concrets posés par l'exercice de leur métier, cherchaient à élaborer une théorie pour résoudre ces problèmes au moindre coût, et la confrontaient à l'épreuve des faits. Toute cette recherche effectuée par des praticiens, à la fois maîtres d'ouvrage et maîtres d'œuvre, s'inscrivait dans le cadre des travaux de fortification qui furent exécutés dans la deuxième moitié du XVIII^e et le début du XIX^e siècle. Le prestige des travaux antérieurs de Vauban a occulté le fait que le volume des terrassements et des maçonneries, pendant cette dernière période d'environ cinquante ans, fut bien supérieur. La connaissance du mécanisme de la stabilité des murs de soutènement était un enjeu économique de première importance. Les ingénieurs du début du XIX^e siècle imprégnés des idées saint-simoniennes, agirent de la même façon, pour remplir au mieux le rôle qu'ils estimaient être le leur dans le cadre des réalisations de la Révolution industrielle.

Pendant la première moitié du XIX^e siècle, les ingénieurs français, à cause de leurs connaissances mathématiques bien supérieures à celle de leurs confrères étrangers, furent occupés par le développement de la théorie de l'élasticité et son application à la résistance des matériaux, domaine dans lequel ils jouèrent un rôle essentiel. Alors que ces théories étaient nées d'une pra-

tique expérimentale, on put souvent observer une dérive vers plus de théorie.

De leur côté, les Anglais plus pragmatiques par tradition culturelle, s'intéressèrent aux propriétés mécaniques des matériaux et en particulier du métal. En Grande-Bretagne, la production de fer avait cru de 690 500 tonnes en 1827 à 3 659 000 tonnes en 1857, alors qu'à cette dernière date la production en France n'était que de 586 000 tonnes.

Mais Lamé (1795-1870) et Clapeyron (1799-1864), dont la contribution à la théorie de l'élasticité entre 1820 et 1830, à la suite de Navier, avec Cauchy et Poisson est bien connue, pourraient être considérés comme les promoteurs du laboratoire d'essais des matériaux, pendant leur séjour comme professeurs à l'école du génie à Saint-Petersbourg, avant 1830. C'est dans le cadre de mission de conseil pour des ouvrages qu'ils construisirent une machine d'essais.

Un autre exemple de démarche expérimentale intéressante, c'est celle adoptée par le capitaine Moreau lors d'essais, conduits en 1825 sur des pieux de sable, qui ont donné lieu à des essais de chargement avec des mesures d'enfoncement d'une précision meilleure que le millimètre et sur des périodes d'observation de six mois. Ce fut l'occasion de mettre en évidence les phénomènes d'arc-boutement dans le sable. Niel, à peu près en 1831, procédait à des mesures à la suite d'améliorations de fondations très médiocres par apport de sable.

Cependant, A. Collin⁽⁴⁾ (1808-1890) demeure l'exemple le plus important d'ingénieurs qui dans le

⁽⁴⁾ Skempton A.W. - « Un pionnier de la mécanique des sols, Alexandre Collin (1808-1890) ». *Annales des ponts et chaussées*, mai-juin 1956, traduction de l'article paru dans les transactions de la Newcomen Society, vol. 25, Londres, 1946.

domaine des sols pratiquait son métier en essayant de s'appuyer sur la méthode expérimentale. Ingénieur des ponts et chaussées, il fut en poste, notamment de 1832 à 1844, au canal de Bourgogne. Il a fait la synthèse des données et observations de ruptures survenues dans cinq digues, sept remblais de canaux, deux talus en déblais de route et 12 tranchées de canaux soit un total de 26 sites. Il avait été le témoin de six d'entre elles, l'acteur de l'analyse des causes et le projeteur des réparations. Sur certains, il y avait eu non pas un, mais plusieurs glissements. Il s'inscrivait dans une lignée d'ingénieurs qui comprend Vauban, Perrenet et Girard dont il reprenait opinions et expériences.

Il a réuni de précieuses observations sur le terrain, en notant les formes des glissements, leur position par rapport à différentes couches, les conditions dans lesquelles se sont produites les ruptures. Il s'est intéressé à la détermination des propriétés de l'argile en faisant des essais de cisaillement en laboratoire, en fonction de la teneur en eau et de la vitesse de sollicitation, au moyen d'un appareil conçu par lui. Il est, à ce titre, le premier expérimentateur des sols en laboratoire. Il a fait des remarques sur la stabilité à long terme et sur la stabilité à court terme des talus, et proposé le premier calcul avec $\phi = 0$.

Sa démarche s'appuie sur l'élaboration d'une théorie à partir d'une analyse aussi rigoureuse que possible des observations sur le terrain. Dans un autre domaine, c'est ainsi qu'à Grosbois, dans le cadre de l'expertise des désordres ayant affecté le barrage, il a procédé en 1838 à des essais de chargement *in situ* des argiles de fondations du barrage de Grosbois pour estimer leur déformabilité. Dès 1833, au moyen de puits, pour la première fois, dans l'histoire du génie civil, il avait effectué un relevé de la surface d'un glissement en rive gauche du même barrage (Fig. 3).

A la différence de beaucoup d'ingénieurs de son époque qui avaient tendance à prendre les problèmes en force, A. Collin savait qu'on ne pouvait pas s'opposer à un glissement qui a démarré, et que l'eau intérieure ou celle infiltrée à partir des pluies était à l'origine de la plupart des sinistres par les modifications apportées au comportement de l'argile dans son ensemble. Aussi distinguait-il, sans les opposer, les moyens répressifs et préventifs (réparation de l'accident et prévention) des moyens seulement préventifs, comme contreforts et aqueducs souterrains. Il s'impliqua également dans la mise au point de procédé comme celui de l'injection au coulis de ciment, qu'il appliqua à la consolidation de la maçonnerie du barrage de Grosbois. Les résultats de son travail furent publiés dans un ouvrage en 1846. Collin n'a pas eu la postérité qu'il méritait. Il fut redécouvert par les chercheurs anglais en 1945.

Cette première période se termine avec les travaux de Rankine (1820-1872) qui réunit dans son manuel de génie civil tout un ensemble de données sur l'angle de frottement, d'observations sur la stabilité des pentes, de considération sur la valeur de la cohésion, et la tenue à court terme des talus. Il y appliquait sa théorie du champ de contrainte pour les sols pulvérulents (1857) et donnait les expressions et valeurs des coefficients de poussée et butée bien connus.

Les laboratoires d'études des matériaux (milieu du XIX^e-premier quart du XX^e siècle)

La période ainsi définie, regroupe la deuxième phase de la mécanique des sols classique, et la première phase de la mécanique des sols modernes. Elle vit l'exécution d'importants travaux expérimentaux d'abord sur les sables puis sur les argiles. Mais il nous semble important de replacer cette évolution dans l'évolution générale des pratiques de l'art de bâtir.

Malgré toutes les approches expérimentales, dont on vient de parler, ce n'est qu'au milieu du XIX^e siècle que furent créés de véritables laboratoires ouverts sur l'industrie et les travaux publics. Il s'agit d'un phénomène général en Europe. L'attention que nous portons à la France ne résulte que de la facilité d'obtenir des informations.

Fin 1851, un laboratoire, spécialement consacré aux essais et analyses des calcaires, chaux, ciments et autres substances employées dans la construction, a été organisé à l'École, alors impériale, des ponts et chaussées. Trois cents échantillons furent testés la première année, 553 la deuxième année, dont la moitié pour des travaux portuaires, ce qui montre à la fois la prédominance de ceux-ci et l'importance de la qualité des mortiers soumis à l'agression de l'eau de mer. Le laboratoire de l'École était le laboratoire du corps et travaillait à la demande aussi pour des clients extérieurs. Il en fut ainsi jusqu'en 1949. Avant la fin du XIX^e siècle, il eut des implantations régionales, ou des laboratoires furent aussi installés sur des chantiers importants et longs, comme celui du port de Boulogne.

Le génie militaire se dota de laboratoire peu après. De même que Vicat ne cessa pas de conduire des essais jusqu'à sa mort, les plus grands fabricants de chaux et ciment, se dotèrent de moyens propres d'essais pour améliorer leurs produits.

En 1854, fut créé un laboratoire d'essais à l'initiative du général Morin (1795-1880), directeur du Conservatoire des arts et métiers⁽⁵⁾. Tresca⁽⁶⁾ (1814-1885) en fut la cheville ouvrière, même si Morin y fut très actif. Il s'agissait d'un service d'expertise gratuit, mis au service aussi bien de l'État que des collectivités locales. Il comprenait un laboratoire d'hydraulique qui permit à Morin, de diffuser son expertise sur les moteurs hydrauliques. Celle-ci était tout à fait exceptionnelle, et avait été acquise aux cours des années 1830-1840, auprès de Poncelet, au moyen d'essais effectués sur tous les moteurs hydrauliques traditionnels ou perfectionnés en usage dans les manufactures de l'État et chez les constructeurs.

Les comptes rendus d'expériences furent diffusés dans les Annales du Conservatoire, gratuitement afin d'en porter les résultats à la connaissance de tous les services techniques officiels. Elles parurent de 1861 à 1880. Contrairement aux espoirs de Morin, c'est le

⁽⁵⁾ Fontanon C. – *Le laboratoire expérimental de mécanique, dans le Conservatoire national des arts et métiers au cœur de Paris*. Délégation à l'action artistique de la ville de Paris, 1994.

⁽⁶⁾ *Les professeurs du Conservatoire des arts et métiers. Dictionnaire biographique (1794-1955)*, sous la direction de C. Fontanon et A. Grelon. INRP/CNAM, Paris, 1990. Notice de Bruno Belhoste.

domaine d'essais des matériaux qui se développa le mieux, partie qui était à la charge directement de Tresca. Entre 1864 et 1869, il mena les expériences sur la déformation des corps solides soumis à une pression élevée, qui permirent à Barré de Saint-Venant (1797-1886) d'établir les équations fondamentales de la plasticité. L'activité du laboratoire déclina après 1870. La mort de Morin en 1880, précipita la fermeture qui fut effective en 1884.

Dans le cadre du Conservatoire, fut créé dans un esprit un peu différent le Laboratoire national d'essai en 1900. Cette structure avait pour but d'assister les petites et moyennes entreprises. Elle comprenait cinq sections : physique, métaux, matériaux, machines, chimie. Il regroupait une soixantaine de personnes. Son activité, à la lecture des rapports d'activité avant la guerre de 1914, était florissante. Dans la section matériaux, 1 340 essais de compression traction flexion avaient été exécutés, contre 3 340 en 1913.

L'échec du laboratoire de Morin serait dû en partie à une mauvaise adéquation avec les demandes du marché. Il y avait une concurrence avec le laboratoire de l'École des ponts et chaussées. Ce dernier s'occupait des structures en métal et du béton, laissant au laboratoire du Conservatoire le domaine des matériaux industriels comme les briques. Ce fut, une occasion perdue pour la pratique technique française de s'ancrer mieux dans l'utilisation des données expérimentales, quand fleurirent partout en Europe, et en Allemagne tout particulièrement, de nombreux laboratoires dans des structures universitaires mais collaborant très étroitement avec l'industrie. Les besoins ne manquaient pas. Le développement technique de la fabrication et de l'emploi des ciments et du béton, l'accumulation des essais de laboratoire, avant même l'emploi généralisé du béton armé, exigeaient que des efforts de normalisation fussent faits. Les conséquences de l'absence de normes et références sur les relations entre maître d'œuvre et entrepreneur étaient extrêmement dommageables. C'est une des explications du nombre très élevé des résiliations de contrat d'entreprise en cours de travaux.

Au milieu du siècle, commencèrent les premières mesures de suivi du comportement des ouvrages. Il nous semble que le premier serait le barrage de Grosbois à partir de fin 1852. Il s'agissait d'un suivi topographique du mouvement de la crête au moyen d'une lunette spécialement prêtée par le laboratoire des ponts et chaussées nouvellement créé. Lors du premier congrès des grands barrages, à Stockholm, en 1933, A. Coyne (1891-1960) analysait les courbes qui furent établies pour les années 1852 à 1861 et reprises après la catastrophe de Bouzey en 1895 jusqu'en 1905 au moins.

Mais le marché de ce type d'ouvrages de génie civil était un tout petit marché. Aussi n'est-il pas étonnant que la mesure du comportement des ouvrages ait surtout été mise en œuvre pour les structures métalliques. On retiendra deux noms, d'abord celui de Dupuy, qui, le premier, eut l'idée d'un appareil pour mesurer le travail du fer (1877), et celui de C. Rabut (1852-1925). Ce dernier, grâce à une campagne de mesure entre 1891 et 1895, a pu éviter le renforcement de la quasi-totalité des ponts du réseau de l'Ouest, en montrant que les liaisons hyperstatiques jusque-là négligées dans le calcul permettaient aux ponts de supporter le poids croissant des locomotives et des convois qui leur étaient attachés.

Dans le domaine des sols, un apport fondamental d'origine expérimentale est celui dû à Darcy (1803-1858) qui dans une note en annexe à son ouvrage⁽⁷⁾ sur l'alimentation des fontaines de Dijon, définissait le coefficient de perméabilité, la loi d'écoulement permanent et celle à charge variable (Fig. 4). Ce fut l'outil qui permit de modéliser l'écoulement de l'eau dans les sols.

La deuxième moitié du XIX^e siècle ne vit guère de progrès dans le domaine de la connaissance des argiles. La mise en évidence du rôle de l'eau, la conceptualisation de la notion de pression interstitielle ont exigé des observations et un apprentissage qui ont demandé un temps, qui ne devait porter ses fruits qu'au début du XX^e siècle avec Terzaghi.

Par contre dans les sables, Boussinesq (1842-1929), sur le plan théorique, établit, d'une part, les équations d'équilibre derrière un mur de soutènement avec frottement entre le massif et le mur, qui ne furent intégrées que par Caquot et Kérisel en 1934, et, d'autre part, les équations permettant de calculer contraintes et déformations dans un massif élastique. Son analyse de 1883 des essais de Darwin, qui s'appuyait sur ses travaux de 1876, est un exemple remarquable d'analyse en retour. Cette approche était complétée par les essais de O. Reynold (1842-1912) sur la dilatance des sables (1887), qui permettait de mieux cerner le domaine de variation de l'angle de frottement d'un sable suivant les conditions de sollicitations.

⁽⁷⁾ Darcy G. — *Les fontaines publiques de la ville de Dijon*. Paris, Victor Dalmont, 1856.

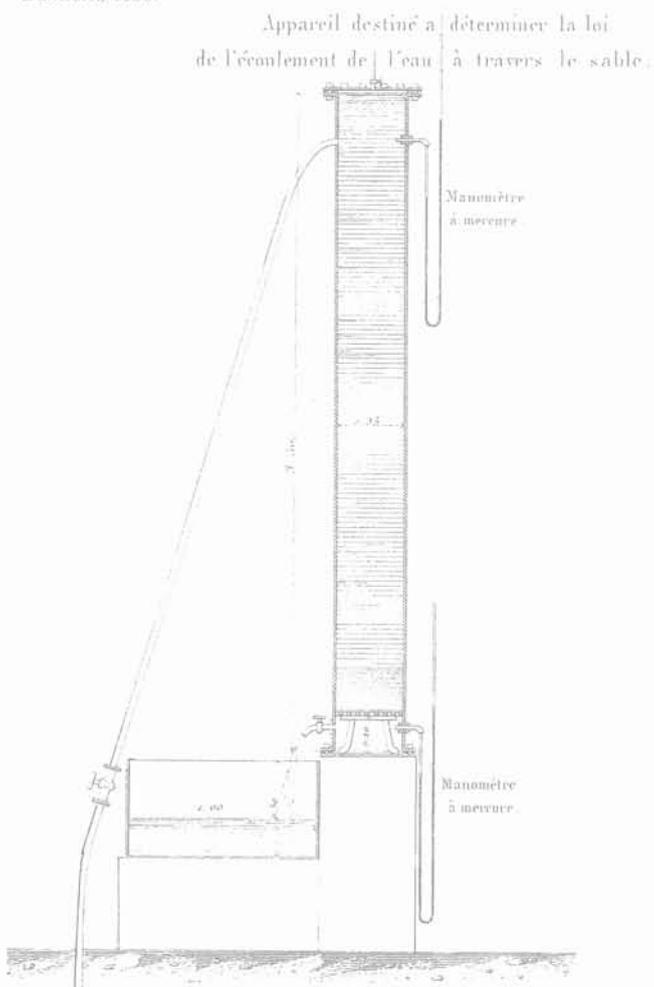


FIG. 4 Dispositif expérimental utilisé par Darcy. Experimental apparatus used by Darcy.

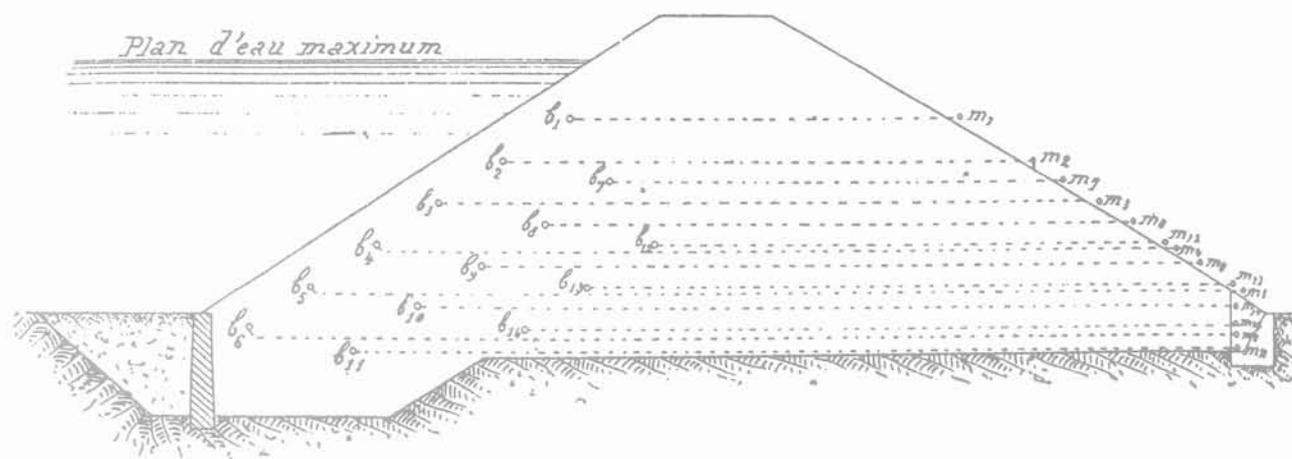


FIG. 5 Propositions pour l'observation des pressions hydrostatiques à l'intérieur des massifs.
Proposal for observation of hydrostatic pressures within earth embankment.

Le développement des travaux d'aménagement du territoire dans le domaine hydraulique, dans toute l'Europe ou dans les territoires sous domination européenne comme les Indes, amena des progrès en réponse à des questions liées à la sécurité des ouvrages. C'est le cas des mesures de pression sous les radiers de barrages d'irrigation fondés sur du sable, conduites par J. Clibborn (1847-1938) et J. Beresford (1845-1927) sur des sites différents peu avant 1900, aux Indes. Ces essais fournirent des données pour comprendre les mécanismes d'érosion interne et de boulangerie, à partir de la connaissance de la répartition des pressions sous les radiers, et des remèdes pour lutter contre. Des nombreux ouvrages, construits aux Indes et en Égypte par la suite, Bligh allait tirer des règles de dimensionnement.

Les argiles allaient revenir au centre des préoccupations des ingénieurs pour les raisons déjà énoncées, relatives au développement des infrastructures. Dans le domaine de la caractérisation de la fraction argileuse, un pas essentiel a été franchi grâce à A.M. Atterberg (1846-1916), chimiste et spécialiste des sols, chercheur dans le domaine agricole en Suède. Il proposa et fit adopter, en 1913, une classification fondée sur la dimension des particules et en particulier la valeur de 2μ pour les argiles. Mais, conscient de son insuffisance, il y ajouta les notions de plasticité définie par la différence entre des teneurs en eau correspondant à la limite d'écoulement sous choc (liquidité) et celle d'émiettement (limite de roulement). Ces travaux furent publiés entre 1910 et 1913. Ils passèrent assez inaperçus, mais Terzaghi les remarqua et les intégra dans son programme de recherches dès 1919.

C'est à partir du terrain que de nouvelles avancées se firent. En France, la digue de Charmes⁽⁶⁾ fut, à la suite de la rupture de son talus amont en 1909, l'occasion pour J. Frontard (1884-1962) de conduire une étude très complète du problème des accidents constatés sur les digues en France tout au long du XIX^e siècle, d'en chercher les causes et de proposer des remèdes. Il étudia l'influence du pourcentage d'argile dans les terres constituant les talus des différentes digues existantes, certaines ayant été affecté par des accidents d'autres non. Ensuite, sur la suggestion de Résal, Fron-

tard réalisa des essais de cisaillement, sur des échantillons constitués de matériaux de même nature que celle de la digue, de 0,77 m², de 20 cm d'épaisseur, soumis à un double cisaillement. Ces essais, conduits sous différentes charges verticales, lui permirent de déterminer un angle de frottement. Il étudia ensuite quelle pouvait être l'influence de la proportion relative de sable et d'argile. Enfin, et ce n'est pas le moins remarquable, il pensait que la pression de l'eau entre les feuillets fonction de la charge régnant dans la retenue avait une importance mécanique, et suggérait au moyen d'un dispositif adéquat d'en mesurer la valeur en différents points (Fig. 5).

À la même époque fut relevée pour la première fois la surface de la nappe qui s'établit dans un barrage en terre, le barrage de Belle Fourche, aux USA, barrage homogène de 36 mètres de hauteur. Soixante-treize points de mesure constitués par des tubes en fer galvanisé, de 2 pouces de diamètre, ouverts aux deux extrémités furent implantés. Les niveaux d'eau furent mesurés depuis 1911 au moins jusqu'en 1924.

A.L. Bell (1874-1956), dans un remarquable exemple d'aller et retour entre la théorie et la mesure en laboratoire, pour vérifier la validité de formule relative à la poussée des argiles et à leur force portante, imagina un appareil de cisaillement direct pour le laboratoire (1915), dont est issu celui que nous connaissons tous.

J. Résal (1854-1919), dans le deuxième tome de son traité sur la poussée des terres (1910), traitait des terres cohérentes, en s'appuyant sur des observations de terrain relatives à la résistance à la traction des argiles.

Un glissement en grand d'un mur de quai, à Göteborg, en 1916, permit à Petterson (1881-1966) de proposer une méthode de calcul de stabilité avec $c = 0$, suivant un cercle de rupture et un découpage de la masse ayant bougé en tranches verticales. Cette proposition fut reprise par Fellenius (1876-1957) pour l'étude de la stabilité de pentes argileuse avec $\phi = 0$, proposition faite pendant la guerre de 1914-1918 et publiée en 1927. Entre 1913 et 1921, une prospection systématique de pentes instables, conduite à l'initiative des chemins de fer suédois, permit de mieux connaître les propriétés des argiles et d'améliorer les moyens de déterminer leurs propriétés.

En même temps qu'il montrait l'importance de la cohésion et des caractéristiques élastiques des sols, Ter-

⁽⁶⁾ Frontard J. - « Notice sur l'accident de la digue de Charmes ». *Annales des ponts et chaussées*, vol. 23, 1914.

zaghi⁽⁹⁾ (1883-1963) établissait que les sollicitations extérieures qui s'exercent sur un massif saturé d'eau se répartissaient entre le squelette, ou ensemble des grains constituant la partie solide du sol, et l'eau ou pression interstitielle. Seul le squelette constitué par les grains présente une résistance mécanique ou résistance au cisaillement pour équilibrer les sollicitations extérieures. Cette résistance sera d'autant plus réduite que la pression de l'eau sera plus élevée. Ce principe unificateur permit alors un développement sans précédent de la géotechnique. Il fut énoncé explicitement en 1923 en relation avec le phénomène de la consolidation de l'argile. Le livre de Terzaghi, *Erdbaumechanik* fondait la mécanique des sols comme une discipline à part entière du génie civil. On peut voir dans l'apport de ce dernier aussi, un aboutissement de l'école expérimentale germanique.

Le temps des laboratoires de mécanique des sols (après 1920)

Les travaux de Terzaghi sur la consolidation des argiles ouvraient une ère nouvelle en apportant aux ingénieurs des outils théoriques qui leur permettaient enfin d'avancer dans la compréhension du comportement des sols, et plus précisément des argiles. Toutefois, cet apport ne pouvait être fécond que si sa mise en œuvre s'appuyait sur la méthode qui avait permis à Terzaghi, de progresser. Ce dernier écrivait en 1927 :

Les problèmes de fondations sont toujours tels qu'une approche strictement théorique et mathématique sera toujours impossible. La seule façon de les résoudre avec efficacité consiste tout d'abord à découvrir ce qui s'est passé dans des cas analogues, ensuite le type de sol concerné, et finalement, pourquoi les opérations ont conduit à certains résultats. En accumulant systématiquement un tel savoir, les données empiriques étant bien définies par une reconnaissance correcte des sols, le calcul des fondations pourrait se développer sous la forme d'une science semi-empirique.

⁽⁹⁾ Skempton A.W. - « Terzaghi's discovery of effective stress », in *From theory to practice in soils mechanics* (Ed. Bjerrum, Casagrande, Skempton), New York, J. Wiley, 1960.

... *L'essentiel de ce travail, l'accumulation systématique de résultats empiriques, reste à faire*⁽¹⁰⁾.

C'était une démarche identique à celle qu'avait suivie Collin, qu'il avait formulée presque dans les mêmes termes. Elle allait être menée sinon à son terme, du moins suffisamment loin pour que des progrès très importants puissent être enregistrés, dans les décennies qui suivirent. Il fallait, d'une part, multiplier les essais de laboratoire pour étudier le comportement des sols à petite échelle, d'autre part, faire des mesures à plus grande échelle sur les sols en place au moyen d'essais *in situ*, et enfin recueillir le résultat d'observations sur le comportement des ouvrages.

C'est dans cet esprit que fut créée entre 1920 et 1934, de façon institutionnelle, une grande partie des laboratoires de mécanique des sols⁽¹¹⁾. Vingt-cinq laboratoires, dont onze pour les États-Unis et quatre pour l'Allemagne rendaient compte de leur activité au Congrès de Cambridge en 1936. Le premier fut créé en 1920 aux États-Unis pour l'étude des routes (US Bureau of public roads). Suivit un laboratoire au Japon en 1923, celui de Freiberg en Allemagne en 1924. Celui de Vienne en Autriche fut créé en 1929 par A. Casagrande au cours d'une mission organisée par Terzaghi, laboratoire dirigé par Léo Casagrande. Ensuite, les créations se succédèrent, celles du MIT et de l'université de Yale en 1930, de celle de Harvard 1932, de la *Building Research Station* à Londres en 1933, à la station d'essais de Vicksburg du corps des ingénieurs (WES) et au *Bureau of Reclamation* (USBR) en 1933, du CEBTP à Paris et de Delft aux Pays-Bas en 1934, de l'université

⁽¹⁰⁾ Terzaghi K. - « La science des fondations. Son état actuel, son avenir ». Communication à la Société des ingénieurs civils américains, *Technique des travaux*, vol. 4 (1928), vol. 5 (1929), traduction des *Proceedings ASCE*, vol. 53 et 55, 1929.

⁽¹¹⁾ Une section spéciale (section A volume 2) fut consacrée à la description des laboratoires existants leur équipement, dans les comptes rendus du premier congrès international de mécanique des sols et des fondations à Cambridge, sous le titre général. *Reports from soils mechanics laboratories or testing apparatus technique of testing and investigations in progress.*

La plupart des informations sur les appareils, méthodes, procédés sont issues des comptes rendus des deux premiers congrès de mécanique des sols, des articles techniques relatifs à ces produits et enfin des traités et manuels de l'époque. Cette bibliographie était trop importante pour figurer dans cet article.

TABLEAU I Historique des essais *in situ*

Nature ou désignation de l'essai	Dates	Auteurs ou promoteurs
Essai à la barre à mine	Pratique immémoriale Au XVIII ^e siècle	Belidor
Essai de chargement à la plaque	1838?	A. Collin
Standard penetration test (SPT)	1902 (prise d'échantillons par battage) 1920 (mise au point de l'essai) 1927 (codification)	C.R. Gow L. Hart, G. Fletcher
Essai de pénétration statique (CPT)	1917 1927 1935 (brevet cône mobile)	Chemins de fer suédois Chemins de fer danois Barentsen
Scissomètre (<i>vane test</i>)	1948	L. Carlson
Pressiomètre	1954	Ménard
Piézocone	1974 1976	Janbu, Seneset L. Parez

TABLEAU II Historique des méthodes et matériels de sondages et de prélèvement

Nature ou désignation du matériel ou des méthodes	Dates	Auteurs ou promoteurs
Puits	Pratique immémoriale Au XVIII ^e siècle	Délius, Perronet, Bossut
Percussion	Pratique très ancienne, connue des Chinois	
Tarière	XIV ^e siècle XVI ^e siècle	B. Palissy
Rotation et couronne diamant	1862	G.A. Leschot
Rotary	1901	J.-F. Lucas
Carottage électrique	1927	C. Schlumberger
Tarière et lançage hydraulique	1942	O. Mohr (méthodologie)
Divers types de carottier pour sol meuble à partir de 1920	1920 1948	Carottier de Mohr Hvorslev (condition de mise en œuvre des carottiers à mince paroi)
Carottiers à piston		
Carottier Denison	1940	Johnson

de Cornell en 1935. Bien sûr cette énumération n'est pas exhaustive.

Il n'est pas dans notre propos de retracer tous les progrès de la mécanique des sols après la Seconde Guerre mondiale. Nous souhaitons simplement, dans la continuité du regard que nous avons porté sur le passé, montrer la rupture intervenue non dans la nature des recours à l'expérience, mais dans la quantité des outils mis à la disposition des ingénieurs, et celle des informations qui ne pouvaient qu'en résulter. Le développement des moyens de calcul, à partir des années 60, va permettre de traiter les informations obtenues ou de les utiliser dans le cadre d'une modélisation sans précédent jusqu'alors.

Mais il n'est pas inutile d'insister sur la difficulté, pour une communauté technique, de faire sienne une avancée technique. Bien que Terzaghi eut de façon très claire précisé la notion de pression interstitielle dans des articles en 1924, 1927, 1932, et 1936, on peut lire sous la plume de plusieurs ingénieurs du *Bureau of Reclamation* que ces derniers considèrent au début la notion de pression interstitielle comme un phénomène de laboratoire, et n'en tinrent compte pour expliquer des instabilités de pentes qu'à partir des années 1937 à 1938.

Les tableaux qui suivent montrent l'évidente corrélation entre la mise en place des structures et le développement des moyens de reconnaissance et de mesure dont disposèrent les ingénieurs en moins de trente ans, et ceci malgré la Seconde Guerre mondiale.

Pour deux des plus importants essais *in situ*, on a indiqué plusieurs dates et auteurs ou promoteurs, pour souligner le caractère très progressif des avancées et la succession des intervenants dans des pays différents, soulignant par là même le caractère collectif de ce travail dû à l'extrême complexité du réel.

Le développement de la mécanique des sols, après 1920, la concomitance avec celle des grands ouvrages hydrauliques n'étant pas un hasard, a exigé de son côté la mise en œuvre de techniques de prélèvements de roches meubles qui perturbent le moins possible le sol,

pour pouvoir réaliser les essais qui s'imposaient pour caractériser les sols.

Le développement de la pratique des sondages dans le génie civil est dû dans un premier temps à la construction des grands barrages à la fin du XIX^e et au début du XX^e siècle. Les sondages avaient été surtout utilisés pour trouver de l'eau et en particulier en exploitant les nappes artésiennes, dès la fin du XVIII^e. On citera les noms de Mullet (1792-1872) qui après dix ans d'effort parvint à 500 m de profondeur en 1843 à Grenoble, de Degoussée et enfin de Lippman.

A Serre-Ponçon entre 1899 et 1925 et à Génissiat à partir de 1910, les moyens des sondeurs étaient encore très limités. Le procédé de perforation par rotation avec des couronnes diamant, fut mis au point avec beaucoup de difficulté à cause du problème de fixation des diamants. Ce n'est qu'après 1920, que les performances des moyens de reconnaissance furent sensiblement améliorées. La construction de très nombreux barrages en particulier aux États-Unis et dans toute l'Europe, est certainement une des raisons des progrès effectués, qui se sont appuyés par ailleurs sur les moyens mis en œuvre dans la prospection pétrolière et minière.

Enfin, le dernier tableau donne les dates à partir desquelles commença la mise au point des matériels d'auscultation, mise au point souvent difficile.

Le tableau suivant donne la chronologie des essais de sol qui simultanément utilisèrent les échantillons prélevés.

Nous terminerons cet historique sur quelques mots concernant la description des sols, dont la codification a beaucoup d'importance pour la transmission de l'expérience. Casagrande disait que des deux chapitres de la mécanique des sols les plus sujets à discussion, si celui de la résistance au cisaillement des sols est le plus difficile, celui de la classification des sols est le plus confus⁽¹²⁾. A partir de la notion de courbe granulométrique, et des notions développées par Atterberg, les

⁽¹²⁾ Casagrande A. – « Classification and identification of soils ». ASCE, Transactions, vol. 113, 1948.

TABLEAU III Historique des méthodes et matériels de laboratoire

Nature ou désignation des appareils	Dates	Auteurs ou promoteurs
Équipement pour l'analyse de la fraction argileuse	1932	A. Casagrande
Coupelle pour la détermination de la limite de liquidité	1932	A. Casagrande
Appareil de cisaillement direct	1915 1934 (normalisation)	A.L. Bell A. Casagrande
Appareil de chargement pour l'étude de la consolidation	1919 1936 (normalisation)	K. Terzaghi A. Casagrande
Cellule de chargement triaxial Première mesure de pression interstitielle	1932 1936 ? 1957	Casagrande USBR Bishop et Henkel (traité)
Appareil de cisaillement par torsion circulaire	1935	Hvorslev

TABLEAU IV Historique des matériels d'auscultation

Nature du matériel ou des méthodes	Dates	Auteurs ou promoteurs
Relevé topographique	Structures, début XIX ^e siècle ? Barrages, Grosbois 1852	
Auscultation des structures métalliques	1877 1890	Dupuy C. Rabut et Manet
Relevé de niveau de nappe dans un barrage en terre	Début XIX ^e siècle ? Belle Fourche 1911 1933	USBR USBR (WLI)
Cellule à contre-pression	1916 1938 1958	Goldbeck USBR (HPI) F. Glözl
Extensomètre à résistance tendue Cellule Carlson	1925 1930 1952	Carlson Carlson
Extensomètre à corde vibrante	1930	A. Coyne
Piézomètre ouvert	1949	A. Casagrande
Cellule à jauges	1955	W.E.S.
Piézomètre hydraulique	1939 1960	USBR Bishop
Piézomètre à corde vibrante	1958	Télemac J. Bellier

moyens offerts par les laboratoires pour mesurer ou établir les caractéristiques correspondantes ont permis une description rationnelle et une classification, qui seules permettaient la transmission des données de l'observation, et qui constituait l'outil à la base de bien des corrélations. Feld, dans un article sur les origines de la mécanique des sols publié dans les actes de la conférence de Rotterdam, en 1948, consacre un paragraphe à ce problème. Il cite à cet effet plusieurs auteurs, depuis Evelyn qui exposait la question, en 1675, devant la Royal Society, jusqu'à Humphrey David qui traitait ce problème du point de vue de l'agriculture en 1813. Il citait au passage les contributions de Lemaire (1737), Querlonde (1743), Chauvelot (1783). Toutes les définitions s'appuyaient sur une description naturaliste et laissaient une grande part d'interprétation à ceux qui voulaient s'en servir.

Skempton rappelle la description de Bélidor, accompagnée de valeurs de poids volumique, distinguant rocher, sable et terre, qui lui semble la première et la plus complète de celles du XVIII^e siècle.

Nous avons recherché tout au long du XIX^e siècle quelles pouvaient être les données de référence sur les sols. L'absence de références chiffrées et de mode de leur obtention est certainement une des explications des réclamations sans fin des entrepreneurs et des très nombreuses ruptures de marché. Il était dès lors très difficile de juger de la validité des récriminations tant de la part de l'entrepreneur que du maître d'ouvrage. Par exemple la granulométrie des sables criblés depuis des temps immémoriaux n'a été quantifiée que lors des études sur le béton de Féret (1892).

De nombreuses classifications granulométriques y compris pour la partie argileuse furent proposées après 1920. Mais c'est à partir de l'entrée en guerre des États-

Unis, pour juger de l'aptitude d'un site à la construction d'un terrain d'aviation que Casagrande élaborait ce qui devait servir au cadre d'une classification unifiée des sols en intégrant les données granulométriques, les limites d'Atterberg, et en définissant des pratiques d'essais en laboratoire et des procédures d'identification sommaire sur le terrain.

Remarque sur une exception française

Le développement de tous les matériels de prélèvement, de mesures *in situ* ou en laboratoire souvent imparfaits, mais qui avaient le mérite d'orienter ou d'appuyer le travail créatif de l'ingénieur, eut pour conséquence de créer un climat propice au travail d'innovation des procédés de construction. C'est tout un chapitre de la mécanique des sols appliquée, qu'il convient de ne pas passer sous silence, à défaut de pouvoir le traiter en détail dans le cadre de cet article. Il relève plus peut-être qu'un autre de l'approche expérimentale de la mécanique des sols.

Ce sont les entrepreneurs français qui y furent particulièrement brillants pour tous les procédés relevant de l'injection et des fondations spéciales. En fait, c'était une tradition qui remontait au milieu du XIX^e siècle, qui résultait de la conjonction de deux conditions particulières propre à l'espace technique et économique français. L'entrepreneur français s'est trouvé très vite confronté à un marché étroit dans lequel la compétition était très dure. Il trouvait en face de lui un client qui était à la fois maître d'ouvrage et maître d'œuvre, qui n'a pas dédaigné d'écouter ses propositions d'amélioration des projets qui avaient été établis par ses propres services. L'innovation s'imposait comme moyen d'augmenter ses marges⁽¹³⁾.

La confusion de la fonction de maître d'ouvrage et de maître d'œuvre, particulière à la France, avait pour origine le fait que les grands travaux pour l'essentiel étaient financés ou garantis par l'État, au contraire de ce qui se passa en Angleterre. On comprend que l'État ne pouvait pas confier à un tiers la conception et la gestion des travaux de construction des fortifications, d'arsenaux, des routes qui les desservaient, des canaux, dont il avait conçu le réseau, en vue d'aménager le territoire suivant une vision qui lui était propre.

Nous voyons dans la présence, sur ordre de Colbert, du chevalier de Clerville (1610-1677), commissaire général aux fortifications prédécesseur de Vauban, auprès de Riquet qui ne pouvait financer que 20 % de la dépense du canal du Midi, le début d'une pratique qui relève de l'exception française, et qui s'étendit sur plusieurs siècles. C'est le chevalier de Clerville qui établit le devis du canal, c'est-à-dire au sens du XVII^e siècle, le projet. C'est ainsi qu'il proposa la réalisation d'un réservoir d'alimentation unique au site de Saint-Feréol, au lieu d'une dizaine de réservoirs comme pour le canal de Briare⁽¹⁴⁾.

⁽¹³⁾ Barjot D. – « L'innovation dans les travaux publics (XIX^e-XX^e siècles), une réponse des firmes au défi de la demande publique ». *Histoire, économie et société*, n° 2, 6^e année, 1987.

⁽¹⁴⁾ Gazelle F. – « Riquet et les eaux de la montagne noire, l'idée géniale de l'alimentation du canal », dans *Histoire du canal du Midi*. Édition du tricentenaire sous la direction de J.D. Bergasse, vol. 4, 1985, p. 145-169.
Voir aussi tome 3, Blanchard A., Bergasse J.D. – « Ingénieurs du Roy et canal des deux mers ».

L'expertise technique des services de l'État permettait un dialogue fructueux avec les entrepreneurs, facilité par la possibilité de passer des marchés sur concours (1882), d'autant plus que les frontières entre entrepreneurs et Administration étaient franchies facilement avec une pratique très libérale des congés. Il faut y voir l'origine des compétences très étendues des entrepreneurs français, qui au cours du XIX^e brillèrent déjà dans les travaux portuaires et dans les fondations à l'air comprimé⁽¹⁵⁾. Ces compétences aidèrent à la réussite à l'exportation de la profession. En 1913, les dix plus grandes entreprises françaises (SGE, GTM, Hersent, Fougerolle, entre autres), réalisaient 60 % de leur chiffre d'affaires à l'exportation⁽¹⁶⁾. La mondialisation qui nous concerne tant aujourd'hui, était alors aussi avancée que dans les années 70.

Les sociétés d'électricité, fondées à la fin du XIX^e siècle, créèrent également les conditions d'une liberté qui facilita les initiatives, et une créativité que ne permettait pas la lourdeur d'un service d'État. Une partie de la communauté technique française trouva en Algérie des conditions géomorphologiques qui l'obligea à des solutions originales, en particulier pour tout ce qui touchait au sol. Sa réussite fut connue des États-Unis. Elle y trouva aussi la solution de l'injection des alluvions⁽¹⁷⁾. Ces pratiques furent continuées par les grandes entreprises publiques après la Seconde Guerre mondiale.

Les échanges et transferts technologiques

L'exposé sommaire qui vient d'être fait montre que, dans l'activité du génie civil et en mécanique des sols plus particulièrement, les échanges et transferts technologiques sont inhérents à la pratique de ce qui reste par bien des aspects un art. On peut distinguer comme canaux des échanges technologiques, les hommes, les structures comme les Académies et les sociétés savantes, les livres techniques, les revues, les missions et, enfin, les congrès. On se propose d'évoquer quelques cas pour chacun des aspects ainsi dénombrés.

Les techniciens ont voyagé à toutes les époques et depuis les plus anciennes. Ils furent les vecteurs des échanges soit qu'ils s'installent dans un autre pays que le leur, soit qu'ils viennent pour des périodes plus ou moins longues, ingénieurs hollandais pour apprendre aux Français les techniques d'assèchement, ingénieurs du Harz pour les mines, les Italiens pour l'irrigation en Provence, et beaucoup d'autres. Lorsque François I^{er} ramena Léonard de Vinci d'Italie, c'était d'abord un ingénieur qui venait avec toute l'expérience de l'Italie dans le domaine des canaux. La première idée du canal du Midi lui est due, en réponse au problème de transport qui lui avait été posé par le pouvoir royal.

Les institutions comme les Académies et équivalentes furent des foyers d'échanges dès leur création.

⁽¹⁵⁾ Glossop R. – « The invention and early use of compressed air to exclude water from shafts and tunnels during construction ». *Géotechnique*, vol. 26, n° 2, juin 1976, p. 253-280.

⁽¹⁶⁾ Barjot D. – « La grande entreprise de travaux publics (1883-1974), contraintes et stratégie ». Thèse de doctorat d'État, Paris IV-Sorbonne, 1989.

⁽¹⁷⁾ Glossop R. – « The invention and development of injection process ». Part I, 1802-1850, *Géotechnique*, vol. 10, sept. 1961. Part II, 1850-1960, *Géotechnique*, vol. 11, dec. 1960.

Belidor fut *Fellow of the Royal society* de Londres, consacrée aux sciences et fondée en 1662, comme Peronnet ultérieurement. L'Académie des sciences à Paris fut fondée en 1666. Elle comprenait des membres étrangers comme Huyghens. D'autres capitales se dotèrent d'institutions analogues, les capitales provinciales françaises également.

Des sociétés pour favoriser le développement scientifique à des fins industrielles ou furent fondées, comme la Société pour l'encouragement à l'industrie nationale (SEIN) en 1802 à Paris puis à Mulhouse en 1827. Puis vinrent les sociétés savantes, celle des ingénieurs civils anglais en 1818, la Société de géologie à Londres 1820, à Paris 1830, la Société des ingénieurs civils à Paris 1848, pour n'en nommer que quelques-unes. Toutes ces sociétés, comme les Académies, avaient des bulletins ou des recueils des mémoires acceptés par leurs instances.

Les transmissions du savoir étaient fonction des supports matériels de l'époque. Au XVIII^e siècle les revues étaient exceptionnelles, mais les livres sans être aussi abondants qu'au XIX^e siècle, existèrent en nombre conséquent à partir du début du XVIII^e siècle (Gautier, Belidor, Dubuat, Bossut, Lalande, Gauthey, Girard). Les traductions étaient choses ordinaires, Delius, Silberschlag, auteurs allemands, furent traduits, mais aussi des auteurs anglais, italiens. Les traductions se faisaient dans les deux sens, même si la pratique du français était très répandue dans les classes aisées de toute l'Europe. Le mémoire de Coulomb fut traduit en allemand par Woltman en 1790, les aides-mémoires de Morin en anglais pour les États-Unis où le corps des ingénieurs à ses débuts utilisa les manuels français de Navier.

Le nombre de livres publiés augmenta tout au long du XIX^e siècle. Mais le phénomène nouveau fut celui de la multiplication des revues. Bruno Jacomy rapporte qu'il y avait dix périodiques scientifiques et techniques à la fin du XVIII^e siècle, cent au début du XIX^e et dix mille vers 1900.

En France, dans le domaine du génie civil, deux revues méritent une mention spéciale, pour le XIX^e siècle, les *Annales des ponts et chaussées*, fondées en 1830, et le *Génie civil*, fondé en 1880. La première, véritable organe du corps des ponts et chaussées, portait à la connaissance de ses abonnés toutes les avancées ou réalisations dans le domaine qui était le sien avec une périodicité trimestrielle. La revue du *Génie civil*, devenue très rapidement hebdomadaire, était plus ouverte sur l'ensemble des techniques. Il faut dire que celle-ci a été créée à un tournant du siècle qui marquait, avec l'irruption de l'électricité, le début de la deuxième révolution industrielle. Ces deux revues étaient extrêmement ouvertes sur le monde, et contenaient des comptes rendus abondants des livres et publications étrangères ainsi que des comptes rendus de visites ou de missions.

Un autre canal de transfert technique est celui des missions d'études. Les missions de visite en Grande-Bretagne et aux États-Unis se succédèrent sans discontinuer tout au long du XIX^e siècle, dès la fin des guerres napoléoniennes. Mais elles ne se limitèrent pas à ces seuls pays, elles se firent partout où il y avait quelque chose à apprendre, comme les irrigations en Italie. À des fins différentes, les séjours d'assistance technique des ingénieurs du corps des ponts furent fréquents (Brésil, Pérou, Russie, Europe centrale, Turquie,

Égypte). Cinq pour cent du corps étaient détachés à cet effet vers 1873.

Vint ensuite le temps des congrès qui se développèrent dans un premier temps à l'ombre des expositions universelles, dont la première est celle de Londres en 1852, suivie de cinquante-neuf autres jusqu'en 1920. D'autres expositions internationales mais spécialisées comme celle de 1881 à Paris, consacrées à l'électricité, marquèrent leur époque.

Le premier congrès de génie civil eut lieu à Paris en 1880, celui de la navigation intérieure en 1885 à Bruxelles, celui de l'association internationale pour l'essai des matériaux en 1889 qui en 1901 tenait à Budapest son quatrième congrès.

Dans les années 1880, début de la seconde révolution industrielle, une accélération dans le rythme des échanges se fit sentir. Au congrès de navigation intérieure de Paris en 1892, il y avait 1 472 délégués venant de 22 pays différents. Ces réunions furent des occasions de rencontres au cours desquelles se tissèrent toujours plus nombreux des liens personnels entre hommes de métier, qui facilitèrent l'échange d'expérience.

Au fur et à mesure, de nouveaux congrès internationaux furent institués pour répondre au besoin d'approfondissement de la connaissance, celui de la Houille Blanche en 1902, de la Route en 1908, des Grands Barrages en 1933. Le premier congrès de la Mécanique des sols, à Cambridge, en 1936, s'inscrivait dans une évolution tout à fait normale. Il réunit 206 participants.

Parmi les techniques ou procédés, objets de transfert technologique dans des domaines connexes à la mécanique des sols, on peut citer le barrage en maçonnerie moderne, dont le Furens (1862-1866), près de Saint-Étienne, fut le prototype. Appelé le barrage français, il servit de modèle dans le monde entier. À l'inverse, on remarquera le transfert des États-Unis vers la France, des techniques du barrage en terre et la très grande vitesse à laquelle l'assimilation en fut faite, après la Seconde Guerre mondiale.

Conclusion

Cette histoire n'a pas de conclusion, puisqu'elle se continue sous nos yeux, certains d'entre nous y étant particulièrement actifs. Toutefois, après ce survol très rapide et forcément réducteur, il n'est pas inutile d'insister sur certains traits que nous n'avons peut-être pas assez soulignés.

Le génie civil et la mécanique des sols qui fait partie intégrante du premier, ont été élaborés à partir d'une pratique expérimentale. Ceci ne veut pas dire que l'on peut se dispenser, ou tenir pour négligeable l'approche théorique. Cette dernière permet peut-être seule de dépasser, de conduire et d'organiser l'étude expérimentale. Mais celle-ci doit « faire apercevoir, démêler et déterminer les principes eux-mêmes, ou les lois scientifiques, les bases scientifiques... de l'établissement des équations qui en seront l'expression⁽¹⁸⁾... ». Elle est au départ de tout progrès.

Tout ce travail trouve sa justification dans la réalisation des projets dont le comportement prime toute

⁽¹⁸⁾ Barré de Saint-Venant – « Sur le but théorique des principaux travaux de Henri Tresca ». Comptes rendus de l'Académie des sciences, 13 juillet 1885.

autre approche et celle du calcul en particulier. Ceux-ci ne sont pas commandés par une spéculation gratuite mais par la satisfaction des besoins de la société de l'époque, besoins dont l'économie n'est pas la seule raison. Les ingénieurs ne font que répondre à un défi permanent imposé par la demande publique ou privée.

Le champ du génie civil n'est pas celui de l'invention mais de l'innovation, celle de matériaux (ciment, béton, béton armé et précontraint), de procédés (l'injection, les fondations spéciales, la terre armée), d'ouvrages (barrages en terre, barrages-voûtes). Il est un lieu de synthèse de tous les moyens du système technique d'une époque donnée.

Si la communauté technique française a joué un rôle éminent pendant près de deux siècles dans ce domaine, au point d'être considérée par un historien anglais comme la patrie du génie civil, c'est parce que l'espace français politiquement unifié plus tôt que bien d'autres pays en Europe, et qui était aussi le plus vaste, avait besoin d'être défendu, et aménagé. Au début du xx^e siècle, la mise en valeur de l'Ouest américain eut

des conséquences identiques dans le développement de la mécanique des sols pour les États-Unis.

Mais, si cette même communauté a su si bien remplir sa mission, c'est qu'elle y avait été très bien préparée. Dès la fin du $xviii^e$ siècle, il y avait en France cinq écoles d'artillerie et trois écoles d'hydrographie. Ensuite, au $xvii^e$ siècle, la France a su se doter d'écoles dans le génie civil et les domaines connexes bien avant les autres pays. On se rappelle tous de l'École des ponts et chaussées fondée en 1747 ou de l'École polytechnique en 1793, ou de l'École centrale en 1829. On oublie plus facilement l'École des arts et métiers en 1780, des mines de Paris 1784, celle de Saint-Étienne 1816, l'École d'artillerie de Metz en 1804.

Coulomb était l'élève de l'École du génie de Mézières, fondée en 1748. On a cité le nom de l'abbé Bossut qui fut son professeur, un autre maître dans ce même établissement s'appelait Monge.

Cette leçon de l'importance de la formation des hommes est toujours actuelle.

DENEBOLA-LCPC

Un logiciel de calcul des écrans de soutènement
(rideaux de palplanches, parois moulées)
par la méthode du coefficient de réaction

Basé sur la méthode de calcul aux coefficients de réaction, **DENEBOLA-LCPC** permet de **déterminer** de manière rapide et aisée **les efforts et les déformations dans un écran de soutènement** fiché dans le sol, aux différentes phases de travaux et d'exploitation. L'inertie de l'écran peut être variable et il peut être soumis à :

- des efforts de flexion en tête et à la base et, plus généralement, à des conditions aux limites les plus diverses ;
- des efforts hydrauliques dus aux pressions interstitielles ;
- l'action de tirants (précontraints ou non) et butons ;
- des moments extérieurs imposés ;
- des déplacements imposés.

La méthode repose sur une modélisation simplifiée de l'action du sol sur l'écran dans laquelle l'action du sol sur l'écran est réduite, en chaque point de l'ouvrage, à gauche et à droite, à une pression horizontale, liée au déplacement du niveau considéré par une loi de réaction. Les lois de réaction utilisées couramment, mais abusivement désignées par le terme de « lois élastoplastiques », sont des lois de mobilisation linéaire avec paliers de poussée et de butée. Elles sont donc typiquement composées de trois parties :

- le domaine de poussée limite caractérisé par la pression p_c ;
- le domaine de butée limite caractérisé par la pression p_b ;
- le domaine pseudo-élastique, caractérisé par le coefficient de réaction k_h ; ce domaine peut lui-même être décomposé en sous-domaines, caractérisés par une succession de valeurs de k_h .

Initialement développé par le Laboratoire central des ponts et chaussées, ce logiciel a été mis à jour et doté de nouvelles fonctionnalités à l'occasion d'une évolution visant à offrir une interface utilisateur plus conviviale, fonctionnant sous Windows 9x ou Windows NT.

Prix de lancement jusqu'au 20 décembre 2000

20 000 F HT (23 920 F TTC)

Distribué par



Presses de l'école nationale des
Ponts et chaussées

28, rue des Saints-Pères - 75343 Paris cedex 07
Tél. : 33 (0)1 44 58 27 40 - Fax : 33 (0)1 44 58 27 44
e-mail : presses.ponts@mail.enpc.fr