

J.-L. BORDES
20, rue de Madrid
75008 Paris

Aperçu historique sur la notion de la pression de l'eau dans les sols et les milieux fissurés du XVIII^e au début du XX^e siècle, en France

Résumé

L'étude de l'effet de l'eau dans les sols et les roches a demandé près de deux siècles d'observations et de tâtonnements, avant qu'il soit possible d'arriver à une formulation théorique qui a aidé, sinon permis, la réalisation des ouvrages de génie civil nécessaires aux très grands aménagements hydrauliques de notre époque.

Brief history of water pressure concept in porous and fissured media, from XVIIIth to beginning XXth centuries in France

Abstract

For nearly two centuries, observation and experimentation about water pressure in soils, rocks and structures have been carried out before succeeding in building up a theoretical model, which helped if not allowed the construction of large civil engineering works, required by the water management projects of our time.

« Par exemple, les uns comprennent bien les effets de l'eau, en quoi il y a peu de principes ; mais les conséquences en sont si fines, qu'il n'y a qu'une extrême droiture qui puisse y aller. »

Blaise Pascal

On connaît le rôle primordial joué par l'eau dans l'équilibre interne des massifs de fondations des ouvrages hydrauliques, des talus et les massifs en remblai ou en maçonnerie constituant les barrages. La notion de pression interstitielle ou de pression neutre est le fruit des travaux de Terzaghi (1883-1963), publiés dans les années 20, et a été explicitement définie en 1924. Il s'agit d'une avancée fondamentale qui, par la compréhension qu'elle apportait au comportement des sols, a permis pour partie le développement de la géotechnique et des ouvrages en terre ou fondations exceptionnelles réalisés depuis.

Or on avait beaucoup construit avant. Il a paru intéressant de retracer le chemin malaisé de l'appréhension du rôle de l'eau dans les sols, les roches et les massifs faits de main d'homme, et sa conceptualisation en particulier en France, et d'en montrer les conséquences sur la conception et la construction des ouvrages de stockage et de conduite des eaux.

1

Les précurseurs au XVIII^e siècle

Nos prédécesseurs savaient bien que l'eau s'écoulait plus ou moins à travers les milieux naturels sur lesquels ils construisaient canaux, barrages et écluses. Ils en connaissaient certains des effets pernicious tels que, pertes d'eau et « renards ». Mais, en l'absence de toute théorie, si leurs observations étaient justes, les conséquences qu'ils en tiraient sur les remèdes étaient souvent contradictoires.

Bélibidor (1693-1761) écrivait dans le dictionnaire portatif de l'ingénieur :

« La transpiration en terme d'hydraulique s'entend de l'eau qui transpire et se perd à travers les pores de la terre. Quand on creuse un canal de navigation dans un terrain sablonneux, les transpirations sont quelquefois si considérables que la plus grande partie des eaux s'y perd et qu'il n'en reste point assez pour la navigation projetée. »

L'abbé Bossut (1730-1814) fut le professeur de Coulomb à l'École de génie de Mezières. Il est l'auteur, en 1762, d'un traité sur la construction des digues en terre ou en maçonnerie⁽¹⁾. On assure, disait-il, l'étanchéité des digues en terre par le choix d'une terre de remblai d'une « ténacité suffisante » pour empêcher la filtration des eaux ou par la mise en place d'un corroi derrière le revêtement amont. La filtration, était à son avis, une des causes de la rupture des digues. Il insistait sur les soins à apporter si on ne peut pas éviter de mettre un corps étranger dans la digue, telle une conduite. Il soulignait l'importance de la qualité de compactage « la foulure », en fonction de l'humidification et l'utilité de la présence de sable dans l'argile pour arriver à un bon résultat.

⁽¹⁾ Bossut C. et Viallet, *Recherches sur la construction la plus avantageuse des digues...*, Paris, 1764.

En 1769, dans la traduction française de son ouvrage sur la théorie des fleuves, Silberschlag, après avoir décrit le mécanisme d'alimentation d'une rivière par la nappe de rive et en avoir donné les preuves par la mesure des niveaux d'eau dans les puits, continuait :

« Les liquides pénètrent les corps poreux jusqu'à ce qu'ils trouvent des pores plus fermés qui les arrêtent, ou jusque-là somme des forces attractives de chaque interstice soit en équilibre avec la force avec laquelle le liquide agit.

« L'eau s'écoulerait d'elle-même de l'éponge qui la contient si la force attractive ne la retenait dans ses larges pores ; et une eau qui coule sur des roches ne pénétrera point dans le terrain à moins qu'il ne s'y trouve des fentes ; si elle n'en trouve pas ce serait en vain qu'on voudrait creuser des puits dans les environs.

« La glaise ne laisse pas non plus pénétrer l'eau bien avant, mais il n'y a que bien peu, ou peut être point de rivière qui coule sur de la glaise. Ordinairement, elles coulent sur un fond de sable ou entre des roches. »

En 1773, Coulomb (1736-1806) dans son célèbre mémoire⁽²⁾, insistait sur l'augmentation de la poussée qui s'exerce sur un revêtement par suite de la difficulté à drainer les terres derrière le mur, et de la diminution du frottement des terres due à l'augmentation de l'humidité ainsi que du gonflement corrélatif.

Bossut, Dubuat (1734-1809) père de l'hydraulique moderne, Lespinasse au canal du Midi, Delius auteur allemand, Prony (1755-1839) s'intéressèrent avec des objectifs différents à l'écoulement de l'eau dans de petits orifices ou des canalicules.

Prony avait dû tenir compte de ces phénomènes dans l'exercice de son métier d'ingénieur qui a œuvré dans les marais de Rochefort ou les marais Pontins. Il suppose que les eaux pluviales « comme les gouttes d'eau à travers les particules de pierre et de sable » coulaient sans accélération en suivant la plus grande pente.

Sa description du ruissellement de l'infiltration plus ou moins rapide en fonction de la « perméabilité » ou de la « fissuration » des roches avec la mise en charge de nappe, suivant la géométrie des couches, est tout à fait remarquable par la prise en compte des différents facteurs agissant sur l'écoulement de l'eau dans les sols.

Il y avait, chez tous ces auteurs, une démarche véritablement scientifique mais encore non aboutie, dans laquelle la notion de pression de l'eau avait sa place, mais n'était pas explicitée en l'absence d'un modèle de comportement des sols et du rocher soumis à des sollicitations hydromécaniques.

2

Les canaux, leurs grands barrages et la stabilité de leurs fondations

La Restauration relance le programme de travaux de canaux entamés au XVII^e siècle, et continués et projetés tout au long du XVIII^e siècle. Le problème de l'action de l'eau à travers les massifs et fondations ne pouvait ne pas être au centre des préoccupations des constructeurs.

⁽²⁾ Coulomb C.A., « Essais sur une application des règles de maximis et minimis à quelques problèmes de statique relatifs à l'architecture », *Mémoire de mathématiques et physique présentés à l'Académie royale des sciences par divers savants étrangers et lus par ses assemblées*, Mémoires Académie royale des sciences, 1773, Paris, vol. 7, p. 343-382.

En 1831, Beaudemoulin (1790-1875), ingénieur des ponts et chaussées qui fut affecté, en particulier, au canal du Rhône au Rhin et au canal du Berry de 1821 à 1828, publiait un article⁽³⁾ sur la profondeur à laquelle il convient généralement d'établir la fondation des ouvrages hydrauliques. Il décrivait fort bien le mécanisme de l'érosion régressive et du renard se développant de l'aval vers l'amont.

Toutefois, sa méconnaissance tout à fait normale des lois de l'écoulement (pression, débit) dans les milieux poreux et des conditions d'équilibre dans un massif ne lui permettait pas de conduire son analyse jusqu'à des conclusions correctes. La charge qu'il prenait en compte n'était fonction que de la cote de l'eau amont. Il préconisait l'allongement des lignes de courant par un tapis aval qu'il appelait un arrière radier, et considérait comme nocifs les parafoilles aval. Malgré son allusion à l'action de l'eau dans les interstices, il ne pensait qu'en termes de débit de fuite et de vitesse d'écoulement, et imaginait que les migrations internes de particules permettaient d'obtenir une étanchéité quasi absolue. La pression de l'eau tout au long des lignes d'écoulement était une notion qui lui était étrangère.

Navier (1785-1836) dans son cours à l'École des ponts et chaussées [14], relatif aux ouvrages de soutènements, consacrait un paragraphe aux « effets de l'eau pénétrant les terres », et ne faisait qu'effleurer le problème.

Minard (1781-1870) dans son cours de construction pour la navigation intérieure⁽⁴⁾, qui fit autorité pendant des décennies, écrivait sur les fondations des barrages en maçonnerie.

« Les premières conditions exigent un terrain ferme et compact. Pour empêcher l'eau de s'introduire sous les fondations on forme plusieurs enracinements en contrebas du plan général de dérasement du terrain (Figs 576, 579, 580, 618) ; ils descendent d'un mètre à 1,50 m en contrebas ; ils ont de 1 à 3 m d'épaisseur. Ces enracinements dans le fond des vallons donnant lieu à des fouilles profondes, découvrent des sources qu'il est quelquefois nécessaire d'encaisser et qu'on étouffe quand les maçonneries sont arrivées à leur niveau.

« Il est très essentiel d'empêcher l'eau de pénétrer sous le mur. Lors même qu'elle ne le traverserait pas entièrement, elle exercerait une action de bas en haut qui diminuerait beaucoup la pression du mur sur le terrain et par conséquent sa stabilité. C'est dans ce but, comme dans celui de gêner l'eau dans sa pénétration, qu'on abaisse la fondation, laquelle éprouve alors de la part du terrain en aval une résistance opposée au glissement.

« Les conséquences de la grande pression exercée en amont des digues de hautes retenues, sont les filtrations qui s'établissent dans le terrain naturel, soit enfin à travers la digue même.

« C'est ainsi qu'au réservoir de Tillot (canal de Bourgogne) on a remarqué que les prés en aval du mur se tiennent beaucoup plus humides qu'avant l'existence de la retenue. C'est ainsi qu'au réservoir de Couson, en aval

du mur du milieu, ont apparu des sources qu'il a fallu diriger par des conduits et des barbacanes dans l'aqueduc inférieur de décharge pour les détourner de l'issue qu'elles se frayaient dans le talus extérieur de la digue, et qu'elles auraient promptement dégradé. L'imperméabilité de cette digue n'est rien moins qu'obtenue : l'eau dégoutte de la voûte de l'aqueduc qui conduit aux robinets.

« La communication peut avoir lieu sous les murs à travers des terrains compacts en apparence. Les argiles à feuillets minces et très serrés sur lesquelles est fondé le mur de Grosbois, et qu'on n'entamait qu'au pic et à la mine, en ont fourni la preuve ; il a été reconnu, lors de la construction de cette digue, que les épuisements des fouilles en aval des fondations faisaient baisser le niveau des eaux des fouilles en amont ; les craintes qu'inspirait cette communication ont donné lieu à un corroi de béton (Fig. 576) descendant à 1,50 m au-dessous des enracinements sur une longueur de 160 mètres. »

Ce texte appelle de nombreux commentaires :

Paradoxalement on partira de la fin de l'extrait. Il y est fait référence à la pression de l'eau sous la fondation du barrage. Ceci renvoie à l'analyse qu'avait faite Bonnetat (1783-1870), directeur du canal de Bourgogne de 1829 à 1840, lorsqu'il avait dû rechercher avec A. Collin les raisons des fissures apparues à la première mise en eau, en février 1838, en vue de réparer le barrage et d'assurer sa mise en service. Les observations rapportées par Minard sont très vraisemblablement les siennes, comme le montrent les documents d'archives. L'examen de l'ouvrage avait conduit Bonnetat à calculer la stabilité au renversement et au glissement du barrage de Grosbois en admettant une « pression s'exerçant de bas en haut uniforme », égale à 25, 50 et 100 % de la charge d'eau du réservoir sur toute l'étendue de la base du barrage. Il lui permettait alors de montrer que le barrage ne pouvait pas avoir basculé, mais qu'il avait glissé⁽⁵⁾.

La pression de l'eau y était prise en compte. La figure 1 dont les éléments sont extraits d'un plan qui accompagnait le rapport du 6 août 1838 montre la section étudiée. On y a reporté les formules employées par Bonnetat. On remarquera sur la coupe le double enracinement ou bêche amont et aval.

Minard, en tant que membre de la section navigation du Conseil général des ponts et chaussées, devait connaître ce document. La similitude des termes employés le prouverait. Mais cet auteur pensait qu'une barrière étanche amont (corroi de béton) descendue à une profondeur suffisante, supprimait l'existence de ce qu'on n'appelait pas encore les sous-pressions car le « siphonnage n'était pas possible ». C'est l'objet du début du texte qui fait référence en dernier recours à l'étouffement des sources, pour rétablir l'imperméabilité des couches.

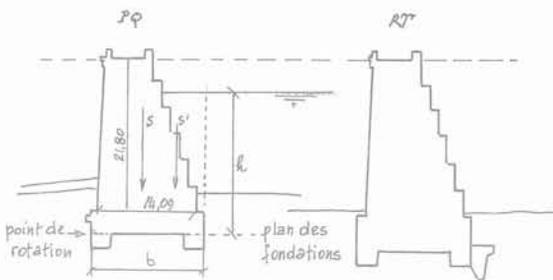
C'était une pratique ancienne. On lit dans le dictionnaire déjà cité de Belidor à l'article sources :

« Lorsqu'il se rencontre quelques sources dans les fondations d'un bâtiment, il faut faire jeter aussitôt beaucoup de cendres et de chaux sur l'endroit et garnir le dessus avec de bons moellons ou briques posés en bain de mortier gras et de bonne qualité, observant d'élever le travail avec beaucoup de diligence pour surmonter promptement l'eau. »

⁽³⁾ Beaudemoulin L.A., « Notice sur la profondeur à laquelle il convient généralement d'établir la fondation des ouvrages hydrauliques », *Bulletin des sciences technologiques* rédigé par MM. Gaultier de Caullery et Nestor Urbain, 4^e section du *Bulletin universel*, sous la direction de M. le Baron de Ferussac, tome 17, 1831.

⁽⁴⁾ Minard C.J., *Cours de construction des ouvrages qui établissent la navigation des rivières et canaux*, École des ponts et chaussées, 1832-1841, Carilian Goeury et Delmont, Paris, 1841.

⁽⁵⁾ « Rapport de l'ingénieur en chef directeur soussigné sur le mouvement subi par une partie du barrage réservoir de Grosbois et les lézardes qui en sont résulté », le 6 août 1838. Archives nationales, F/14/6861, canal de Bourgogne.



d'après le rapport Bonnetat du 6-08-1838

- s surface de la section du barrage sous écrasement.
- s distance du point de rotation à la verticale du centre de gravité de.
- s' surface de la section des eaux qui pressent verticalement sur les redans.
- s' distance du point de rotation à la verticale du centre de gravité de s' .
- η pesanteur spécifique de l'eau.
- η' pesanteur spécifique de la maçonnerie.
- ϕ pourcentage de la section de la fondation sur laquelle s'exerce la pression des eaux du réservoir de bas en haut.

Stabilité au renversement:

$$\eta' s \delta + \eta s' \delta' = m \eta (h^2/6 + \phi b h \cdot 1/2 b) \quad \text{équation d'équilibre}$$

m rapport ou coefficient de sécurité, égal à 1,28 pour $\phi = 1,00$ et à 1,84 pour $\phi = 0,5$

Stabilité au glissement: ϕ frottement

$$\phi (\eta' s + \eta s') \cdot \frac{1}{b} \leq \eta h^2/2 \quad \phi = 0,20 \quad \phi = 0,36$$

FIG. 1 Barrage de Grosbois, calcul de stabilité, 1838.

Grosbois dam, stability computation.

La procédure systématique de l'étouffement des sources est décrite par de très nombreux et éminents auteurs. Il s'agit toujours de la même méthode qui consiste à ménager un ou plusieurs exutoires à l'eau pour permettre la mise en place des parties basses des fondations et d'éviter ainsi le délavage des bétons ou du mortier de la maçonnerie. Dès que la maçonnerie atteignait le niveau piézométrique de la source, on fermait la partie basse de l'exutoire, ou on arrêtait de pomper dans le puisard qui avait été ménagé. Ces dispositions dépendaient de la topographie du terrain. Puis on procédait à l'injection au mortier avec une « pompe foulante » à partir de l'aval des sources par des tuyaux verticaux ménagés dans le ou les drains de conduite des sources à l'aval.

Il y a une contradiction fondamentale entre ce que dit Minard sur les infiltrations possibles et leurs effets, et la recommandation d'étouffer les sources avec leurs conséquences sur la stabilité des barrages, qui ne pouvaient être que néfastes, si l'on ne connaissait pas les modifications apportées, au réseau d'écoulement.

Le but en étouffant les sources, c'est-à-dire, en les refoulant dans le terrain « pour les forcer à prendre leur écoulement par d'autres voies » selon Guillemain (1823-1907), était vraisemblablement de chercher à ne pas perdre d'eau. Elle était fondée sur la conviction que l'on pouvait mettre un poids sur la bonde du tonneau de Pascal. Guillemain soulignait, néanmoins, que les conditions d'équilibre des massifs pouvaient être modifiées par l'introduction de pression dans des fissures préexistantes.

Comme Mary (1791-1870) le proposait également, mais sans s'étendre, il y a des cas, écrivait-il, où il vaut mieux les éloigner des parties où elles pourraient faire un apport nuisible, en les isolant bien des couches qu'elles traversent puis les abandonner à elles-mêmes.

A Bouzey, par exemple, les travaux du mur de garde (parafouille amont) du barrage avaient pris du retard à cause de l'aveuglement des sources, de 1878 à 1880, qui sont à l'origine du premier accident de 1884. La description de l'exécution des travaux est révélatrice des mentalités de l'époque.

On cherchait à couper toutes possibilités d'écoulement en descendant un parafouille jusqu'à un rocher supposé imperméable en drainant les venues d'eau à différents niveaux avant de les étouffer, non sans difficulté, et avec la garantie d'une tenue à une pression de l'ordre de quelques mètres, alors que la charge attendue devait atteindre 20 mètres.

On peut lire le texte de deux façons. Dans la première, on admirera l'intuition qui a guidé la réalisation de cette coupure étanche fort justement située à l'amont. C'est la préfiguration de certaines solutions modernes, mais descendue dans le terrain avec les matériaux et moyens de l'époque.

Dans la seconde on regrettera que les ingénieurs de l'époque n'aient pas associé à l'aval de la coupure le drainage, car l'injection, puisqu'il s'agit en fait de cela, faite en aveugle, pouvait avoir des effets très dangereux. Le drainage aurait été, associé ou non, une démarche utile. Mais il serait allé à l'encontre du souci d'assurer la plus grande étanchéité possible.

Ces méthodes se rattachaient aux pratiques d'injection qui avaient été développées dès 1802 par Bérigny à l'écluse de Dieppe, et employées à de nombreuses reprises dans des fouilles d'écluses ou pour injecter des bétons présentant des vides.

Beaudemoulin en 1851 soulignait les dangers de ces méthodes dans un article publié dans les *Annales des ponts et chaussées* :

« Ce procédé d'aveugler les sources, presque toujours impuissant, est cependant d'un usage général. Les trémies, les grandes caisses, sont des variantes de la même idée ; il semble qu'on ne voit pas bien clair encore dans la question. Le raisonnement a plus de valeur que la force brutale pour triompher des difficultés : j'ai déduit de la théorie des sources exposée dans mes *Recherches théoriques etc.*, un moyen plus rationnel, et partant plus efficace que l'aveuglement, le refoulement : c'est le détournement par des puisards d'éventation. »

En effet, dès 1829, Beaudemoulin avait publié un ouvrage⁽⁶⁾ intitulé *Recherches théoriques et pratiques sur la fondation par immersion*, dans la deuxième partie duquel il proposait pour exécuter les structures des écluses dans les conditions les meilleures, de décompresser la nappe au moyen de puisards disposés autour de la fouille. Comme le montre la reproduction de la figure 2, le problème était de diminuer les circulations d'eau dans les bétons coulés par immersion, dans la mesure où la charge du niveau d'eau dans la fouille de l'écluse était inférieure à celle du « réservoir » des sources. Il y a dans les développements justifiant ce dispositif un ensemble de remarques montrant un très grand sens physique et une approche très pénétrante des conditions de circulations de l'eau dans les différentes couches de sol. Il définit la notion de rayon d'action du puisard, celle d'écoulement non permanent. Il préconise la reconnaissance de la stratigraphie par sondeuse.

⁽⁶⁾ Beaudemoulin L.A., *Recherches théoriques et pratiques sur la fondation par immersion des ouvrages hydrauliques*, Carilian-Goeury, Paris, 1829.

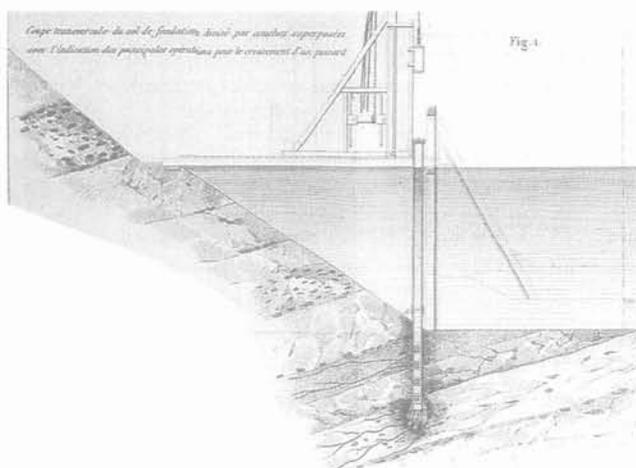


FIG. 2 Puisard d'éventation figurant sur une planche de l'ouvrage de Beaudemoulin, 1829.
Decompression hole as drawn in Beaudemoulin's book on foundations under water.

C'est dans ce même ouvrage que l'on trouve pour la première fois, semble-t-il, le mot sous-pression, qu'il reprend en 1851. Ce mot désignait la pression appliquée à la base de radier d'écluse résultant d'infiltration d'eau depuis la fondation. Il est aussi employé par Mary en 1850 dans son cours de navigation intérieure.

Comme Buffon qui parlait de la « perméabilité non absolue imparfaite et inégale de toute matière solide », Beaudemoulin fait observer « que les mots perméables et étanches indiquent des qualités soit absolues, soit relatives. Aucune des couches superposées peut n'être parfaitement étanche ; mais celle qui est la plus perméable offrant plus de facilité au passage des filtrations, exerce sur elles une sorte d'attraction, ainsi que nous le verrons plus tard, et par rapport à celles-là, les autres couches peuvent être considérées comme étanches. »

Il est assez clair que tout ce travail n'a guère été compris, car il aurait dû tout naturellement conduire à une pratique raisonnée du drainage. Beaudemoulin, dans son analyse parlait non seulement de lignes de courant et de débit, mais aussi de pression :

« Lorsque avec une sonde de fontenier, on fore un trou à travers une couche de marne ou de glaise, on fait souvent jaillir une source. L'eau s'élève à la hauteur due à la pression du réservoir moins les causes retardatrices comme frottement... »

Malgré un avis très favorable du Conseil général des ponts et chaussées, Beaudemoulin dut éditer lui-même le résultat de son travail.

Les ingénieurs de l'époque avaient une conscience physique erronée des propriétés des mortiers en leur attribuant une résistance à la traction sur laquelle on puisse compter, négligeant par ailleurs tous les risques et mécanismes de fissuration. Deux accidents survenus au canal du Verdon donnent une idée de la façon dont les ingénieurs traitaient ce problème.

Le siphon des Bagnols soumis à une charge maximale de 24 m d'eau avait été construit en 1874 au moyen d'un tuyau posé en surface, en béton de ciment Vicat non armé, évidemment, avec un diamètre intérieur de 1 m et une épaisseur de 20 cm soit donc avec une traction maximale de l'ordre de 3,6 kg/cm². Des ruptures successives montrèrent qu'il était vain de faire travailler le matériau dans ces conditions.

Le siphon de Saint-Paul était le plus important par sa longueur et la pression, parmi quatre ouvrages identiques prévus, consistant en deux puits verticaux en haut des flancs des vallées à traverser, reliés par une galerie horizontale. Construit de 1865 à 1869, il avait 282 m de long et une charge maximale de 60 m. L'étanchéité devait être assurée par un revêtement en maçonnerie. L'équilibre global de la galerie résultait du report de la pression sur le rocher encaissant. Malgré un avis défavorable du Conseil général des ponts et chaussées, les travaux furent entrepris et se soldèrent après une série d'échecs répétés, par l'abandon de l'ouvrage en 1874.

On retiendra qu'en présence d'eau, la solution consistait à s'opposer en force à l'action de celle-ci chaque fois que cela était nécessaire. On le constate encore dans le soin avec lequel on bouchait au mortier les fissures du rocher en amont de la fondation du barrage du Furens, ce qui était loin d'être inutile mais insuffisant.

Ces pratiques trouvent peut-être leur origine dans la crainte de la destruction des ouvrages par la formation de renard. Ce phénomène avait été observé depuis toujours dans les digues et batardeaux. La rupture du barrage de Puentes en est un exemple trop fameux. Par ailleurs, 90 % de l'alimentation en eau des canaux étaient requis pour compenser les fuites. La recherche de l'étanchéité maximale était une priorité.

Par absence d'un modèle de référence et par manque de données d'observations fiables, les ingénieurs ne voyaient pas les dangers qui résultaient des pratiques adoptées, sur la répartition des pressions, surtout lorsque l'étanchéité était implantée ou améliorée dans la partie aval des ouvrages.

L'évolution des méthodes de calcul des barrages allait plutôt dans le sens qui ne facilitait pas la prise en compte de la pression de l'eau.

Jusqu'alors, la stabilité des barrages en maçonnerie était vérifiée par un calcul à la rupture au renversement et au glissement, dont le mode est défini dans l'ouvrage de Bossut et repris par la suite par Prony, Navier, Minard, dans chacun de leurs traités. Des pratiques avaient été fixées concernant les valeurs des coefficients de sécurité, 1,5 pour la stabilité au renversement, 2 lorsque la fondation était compressible. Pour la stabilité au glissement, le rapport des forces horizontales aux forces verticales ne devait pas être inférieur à 0,75.

Le développement de la théorie de l'élasticité et de la résistance des matériaux à partir de 1821, les progrès faits dans la fabrication des chaux hydrauliques et des ciments allaient conduire les ingénieurs à s'intéresser à la détermination des efforts se développant à l'intérieur des massifs en maçonnerie pour arriver à une meilleure adéquation des qualités des matériaux et de la forme des massifs. C'est Tortoné de Sazilly qui donna, dans un article des *Annales des ponts et chaussées*, en 1853, la méthode de détermination du profil de ce qui allait devenir le barrage français, qui inspira tous les ouvrages en maçonnerie de la deuxième moitié du XIX^e siècle dans le monde. La grande réalisation, produit de cette démarche allait être le barrage du Furens étudié à partir de 1858 et réalisé de 1862 à 1866.

Mais, compte tenu de l'approche théorique, plus encore que dans le calcul à la rupture, l'eau n'est qu'un paramètre qui reste extérieur à la structure. Le fait que Sazilly qui s'était occupé de mur de soutènement dans les chemins de fer, n'avait jamais œuvré pour les ouvrages hydrauliques, a peut-être contribué à cette dérive.

Excavation et talus, écoulement de l'eau dans le sol et drainage des talus

Pour la construction des canaux et chemins de fer qui avait demandé d'importants travaux, les ingénieurs avaient eu à traiter le problème de la stabilité des talus de déblais et remblais en terre. Un remarquable ouvrage⁽⁷⁾ de synthèse a pour titre *Recherches expérimentales sur les glissements spontanés des terrains argileux*. Il fut publié à compte d'auteur avec l'aide de subventions de divers ministères en 1846, après que deux projets de mémoire à l'Académie des sciences, en 1840 et 1844, et qu'une proposition d'article dans les *Annales des ponts et chaussées*, en 1841, n'avaient pas pu être publiés à cause de problèmes éditoriaux et des réticences de certaines autorités, comme Poncelet.

L'auteur A. Collin (1808-1890), ingénieur des ponts et chaussées, 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 douze tranchées de canaux, soit un total de vingt-six 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 sites, il y avait eu non pas un, mais plusieurs glissements.

S'inscrivant dans une lignée d'ingénieurs qui comprend Vauban, Perronet et Girard, dont il reprend 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 aux 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. Et a fait des remarques sur la stabilité à long terme et sur la stabilité à court terme des talus.

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 marnes de fondations du barrage de Grosbois pour estimer leur déformabilité.

Dès 1833, au moyen de puits, il avait effectué un relevé pour la première fois, dans l'histoire du génie civil de la surface d'un glissement en rive gauche du même barrage.

À 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.

Ces propositions s'appuyaient non seulement sur la forme des glissements, les conditions de survenance des accidents mais sur une analyse du comportement des matériaux argileux qui le conduisaient à dire :

« Nous devons donc conclure de ce qui vient d'être dit que le frottement des massifs argileux est subordonné à des variations très considérables, et que, l'influence de l'humidité ou de la sécheresse pouvant modifier dans d'énormes proportions l'énergie de cette résistance, l'on doit toujours s'attendre, dans la pratique, à voir ces massifs obéir difficilement aux lois d'équilibre que la science leur assigne, à moins qu'on ne puisse les soustraire aux actions variables et contraires de la chaleur et de l'humidité. C'est à ce but que doivent tendre les efforts et les soins des constructeurs. Dériver les sources superficielles ou souterraines et les eaux pluviales, soit par des fossés, soit par des aqueducs, pierrees ou fascinages ; couvrir les talus et plates-formes de végétations épaisses, d'arbrisseaux ou de plantes fourragères dont l'élagage et la coupe ne seront faits qu'après la saison des fortes chaleurs ; y répandre une couche de sable, de graviers ou de terres maigres ; y poser à plat de larges pierres, des schistes ou dalles brutes semblables à celles qui servent pour la toiture des habitations dans quelques localités ; enfin les revêtir au besoin de tuiles protégées par une couche de terre pour les soustraire aux chocs extérieurs et à l'action de la gelée ; tels sont les moyens préventifs que l'on pourra mettre en œuvre dans bien des cas. »

Skempton voit dans le peu d'écho rencontré par la vision de Collin, une des raisons de la stagnation du développement de la mécanique des sols et des ouvrages en terre au XIX^e jusqu'au début du XX^e siècle. Il est certain que l'absence d'outil théorique explique qu'au début du XIX^e siècle prévalait l'opinion qu'un barrage en terre ne devait pas dépasser 15 m, et 30 m au début du XX^e siècle.

Les propositions de Collin concernant la forme des surfaces de rupture, avaient été réfutées en partie par Poncelet qui entendait s'en tenir au plan de rupture proposé par Coulomb, oubliant que celui-ci n'en avait pas fait un absolu mais *« la simplicité des résultats que donne cette supposition, la facilité de leur application à la pratique, le désir d'être utile et entendu des artistes sont les raisons qui nous ont décidés »*. Cet énoncé était de plus suivi d'une proposition de méthode de calcul de l'équilibre d'un coin de terre délimité par une surface courbe (Fig. 3).

Poncelet (1788-1867) considérait en effet le plan de Coulomb comme le résultat de l'observation des faits naturels et permettant l'explication de tous les problèmes de soutènements. Il négligeait systématiquement la cohésion et critiquait l'analyse de Collin en considérant comme possible l'effet de la cohésion mais limité à un effet de surface.

Cependant, dans son mémoire sur la stabilité des revêtements et de leurs fondations⁽⁸⁾, qui marque une étape dans le développement de la mécanique des sols

⁽⁷⁾ Collin A., *Recherches expérimentales sur les glissements spontanés des terrains argileux*, Carillan-Goëury et Dalmont, Paris, 1846.

⁽⁸⁾ Poncelet J.V., *Mémoire sur la stabilité des revêtements et de leurs fondations*, Mémorial de l'officier du génie, n° 13, Bachelier, Paris, 1840.

L'enseignement des accidents

« L'insignifiance apparente des causes et l'effroyable enchaînement des effets, les avertissements répétés de la nature et l'aveuglement insensé des gens, l'habitude prise pour la sécurité, la soudaineté de l'attaque et, le jour venu, l'inconscience du public, ces traits se retrouvent presque toujours dans les accidents de barrage. »

C'est ainsi qu'André Coyne (1891-1960) caractérisait les accidents de barrages qu'il traitait en tout début de ses leçons sur les grands barrages données à l'École des ponts et chaussées⁽¹⁰⁾. Il insistait sur le rôle fondamental de l'eau comme moteur de toutes les catastrophes.

La Commission internationale des grands barrages a fait un inventaire exhaustif des ruptures de grands barrages, c'est-à-dire d'une hauteur supérieure à 15 m au-dessus du niveau des fondations⁽¹¹⁾. Jusqu'en 1900, on a dénombré 55 accidents (dont 13 avant 1800), pour un total de 427 barrages existants, soit 13 %, ou près de 1 sur 8. On recense 117 ruptures jusqu'en 1950 pour 5 628 barrages construits (2 %), 59 de 1950 à 1986 pour 12 138 barrages supplémentaires (0,5 %). Ces chiffres ne tiennent pas compte de la Chine, qui compte environ 18 000 barrages pour 18 000 dans le reste du monde.

En France, pour 35 grands barrages construits avant 1900, on compte une rupture, celle du barrage de Bouzey. Mais trois ruptures sur cinq ouvrages réalisés au XIX^e siècle survinrent en Algérie qui appartenait alors à l'aire technique française.

Ces quelques chiffres montrent avec le temps, la diminution du nombre et de la fréquence des ruptures. Une lecture attentive des statistiques montre qu'une meilleure connaissance de l'hydrologie et des lois qui régissent le comportement des ouvrages, est la raison de la réduction du nombre des accidents.

Nous nous arrêterons à quelques-uns de ceux qui relèvent des effets internes de l'eau, soit dans le corps du barrage, soit dans les fondations, en nous attachant aux barrages en maçonnerie.

Le premier cas est celui du barrage de Puente près de Lorca, dans le Sud de l'Espagne, construit de 1785 à 1791. Il fonctionna pendant onze ans et fut détruit par les eaux le 30 avril 1802. Il avait 50 m de hauteur, 46 m de largeur à la base, 10,89 m en crête. Il était en maçonnerie.

Le projet prévoyait de fonder le barrage au rocher. Mais le sillon alluvial profond rempli d'alluvions perméables ne permit pas de creuser des fouilles que l'on puisse épuiser, à cette époque. Le barrage fut alors fondé en rive sur le rocher sain et dans le lit de la rivière sur des pieux battus de 6,70 m de longueur, disposés en quinconce et noyés sur 2,25 m dans la maçonnerie du barrage.

Rien ne se passa tant que l'eau de la retenue ne dépassa pas la moitié de la charge prévue, à cause d'une série d'années sèches. Le 30 avril 1802, les eaux s'élevèrent à 47 m et la fondation alluviale dans la partie basse céda. Il y eut 608 morts et des dégâts matériels considérables.

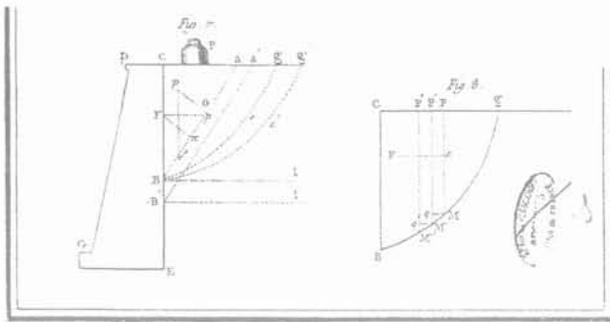


FIG. 3 Figures extraites du mémoire de Coulomb (bibliothèque de l'Académie des sciences).
Sketches from Coulomb's memoir.

par les prolongements donnés à la méthode de Coulomb et un premier calcul de force portante, on trouve des considérations très pertinentes sur l'effet de l'eau. En particulier pour les calculs dans les terrains immergés, Poncelet déclarait que les calculs devaient être conduits en considérant séparément l'effet de l'eau, et celui des terres déjàugées, ce qui est une application du principe de la notion de contrainte effective ou neutre énoncé par Terzaghi quelque quatre-vingts ans plus tard. On voit donc toute la complexité du problème, chacun pouvant approcher une partie de la vérité.

En 1856, la loi de Darcy (1803-1858) constituait un nouveau pas dans la compréhension de l'écoulement de l'eau dans les sols. Darcy était en charge de l'alimentation en eau de Dijon. Le problème n'était considéré que sous l'angle du débit pour l'alimentation en eau des nappes. Il s'agissait d'estimer le débit à travers une couche de sable naturel *in situ* ou artificielle dans le cas d'un filtre. Dans le dispositif expérimental utilisé par Darcy, la pression n'était mesurée qu'aux deux extrémités de la couche traversée⁽⁹⁾. Les fondements théoriques de la loi de Darcy étaient contenus dans les travaux de Poiseuille (1799-1869) et sa loi d'écoulement en régime laminaire dans les tubes (1842). Comme à la fin du XVIII^e siècle, le rapprochement entre les conditions d'écoulement dans un tube capillaire et dans les sols n'était pas fait.

En 1886, un Autrichien P. Forchheimer (1852-1933), professeur renommé d'hydraulique en Allemagne, démontrait que l'écoulement de l'eau en régime permanent obéissait à la loi de Darcy dans les sols, dérivait d'un potentiel (Laplacien nul). On pouvait alors calculer la pression en tout point du réseau d'écoulement. En 1914, il définissait la méthode graphique pour dessiner les réseaux. C'est du côté anglo-saxon qu'eurent lieu des développements sur la connaissance expérimentale des écoulements dans un remblai ou dans une fondation perméable, à la fin du XIX^e siècle, avec Cliborn en 1896 et Beresford en 1898.

Mais le lien théorique entre la pression de l'eau et la stabilité des massifs en terre n'est pas encore établi.

⁽⁹⁾ Darcy H., *Les fontaines publiques de la ville de Dijon*, Paris, Victor Dalmont, 1856.

⁽¹⁰⁾ Coyne A., « Leçons sur les grands barrages », Cours à l'École nationale des ponts et chaussées, 1943.

⁽¹¹⁾ Commission Internationale des grands barrages, « Rupture de barrages, analyse statistique », *Bulletin* 99, 1995.

Les causes de la rupture ne furent pas intelligibles aux contemporains. Il s'agit d'une rupture par renard, conséquence d'une érosion régressive due à un gradient hydraulique excessif pour ce type de terrain constitué par un remplissage alluvial. Un tel phénomène ne fut pas explicité avant le début du xx^e siècle.

Le barrage en maçonnerie de l'Habra, construit en Algérie près d'Oran, de 1865 à 1871 (de 37 m de hauteur retenant 30 millions de mètres cubes) se rompit en décembre 1881 à la suite d'une crue qui entraîna la submersion du barrage à cause d'une capacité d'évacuation insuffisante en le soumettant à des sollicitations supérieures à celles pour lesquelles il avait été dimensionné. Une commission mandatée par le ministère de l'Agriculture, dont le secrétaire était Clavenad examina les conditions de la rupture. Son rapport ne fut jamais publié. La consultation des archives ne permet pas de connaître les raisons. Tout au plus comprend-on que le problème se limita un différend entre la société concessionnaire et l'État dont les ingénieurs avaient fait les études. Il fallait connaître les responsabilités pour déterminer qui paierait la reconstruction. L'affaire fut donc jugée devant le Conseil d'État. Il y avait eu 400 morts. C'est la partie supérieure du barrage qui fut emportée. Plusieurs années après, à partir d'un article publié en 1887 par Clavenad, on peut comprendre de nos jours que le mécanisme de rupture était le même que celui qui devait se manifester à Bouzey en 1895. Des filtrations suspectes à travers les fondations et le barrage s'étaient établies dès 1872, lors d'une crue et de la mise en eau, conséquence d'une mise en extension de la fondation et du corps du barrage.

La catastrophe de Bouzey (1895) devait mettre enfin au premier plan l'importance du rôle mécanique de l'eau (Fig. 4). La commission d'enquête imputa la rupture à l'existence de sous-pression créée par l'eau de la retenue dans une fissure dans le corps du barrage qui se développa à partir du parement amont, et dont l'existence est la conséquence d'un profil insuffisant. Il y eut 87 morts. Le barrage de 22 m de hauteur, d'une capacité de 7 millions de mètres cubes avait été construit de 1878 à 1881. En 1884 un premier accident dû à un glissement sur la fondation avait conduit à un renforcement du profil effectué de 1888 à 1889.

Le premier accident est intéressant par l'éclairage qu'il apporte sur l'approche des techniciens quant au fonctionnement mécanique de la fondation. L'analyse du dossier⁽¹²⁾ des différentes réparations proposées est à ce point de vue révélateur. Il est tenu compte explicitement des sous-pressions négligées dans les calculs initiaux pour expliquer le glissement du barrage sur sa fondation. Dans un des projets qui n'a pas été retenu, il avait été prévu une galerie de drainage située au point bas de la fondation.

En conclusion à sa réflexion sur l'accident de 1895, M. Lévy (1838-1910), dans une note⁽¹³⁾ à l'Académie des sciences datée du 5 août 1895, proposa, pour éviter les dangers résultant de la sous-pression, d'établir à l'avenir en amont des barrages à construire un système de puits constituant un masque qui aurait pour conséquence d'annuler toutes sous-pressions dans le barrage. Pour les ouvrages existants ou ceux qui ne pourraient pas être munis du dispositif qu'il proposait, il énonçait sa célèbre condition, à savoir qu'en tout point du parement amont du barrage la contrainte verticale devait être supérieure à la valeur de la pression de l'eau de la retenue en ce même point. Mais dans son esprit, ceci n'était qu'un palliatif. La solution véritable consistait dans l'annulation des sous-pressions comme il l'affirmait :

« Le danger spécial aux barrages de grande hauteur tels qu'ils ont été établis jusqu'ici, aussi bien à l'étranger qu'en France, provient de la sous-pression ou pression ascendante qu'y produit l'eau lorsque, par des fissures, elle parvient à pénétrer dans la maçonnerie sur une étendue suffisante. »

« Une augmentation même exagérée de leurs dimensions ne ferait pas complètement disparaître ce danger. Il est assez analogue à celui que présenterait une chau-

⁽¹²⁾ Canal de l'Est, « Projet de reprise en sous-œuvre de la digue de réservoir de Bouzey » D. Hauser, 26 avril 1887, relevé piézométrique novembre 1889 et décembre 1890, Archives nationales, F/14/13056.

⁽¹³⁾ Lévy M., « Quelques considérations sur la construction des grands barrages », comptes rendus des séances de l'Académie des sciences, T. CXXI, séance du 5 août 1895.

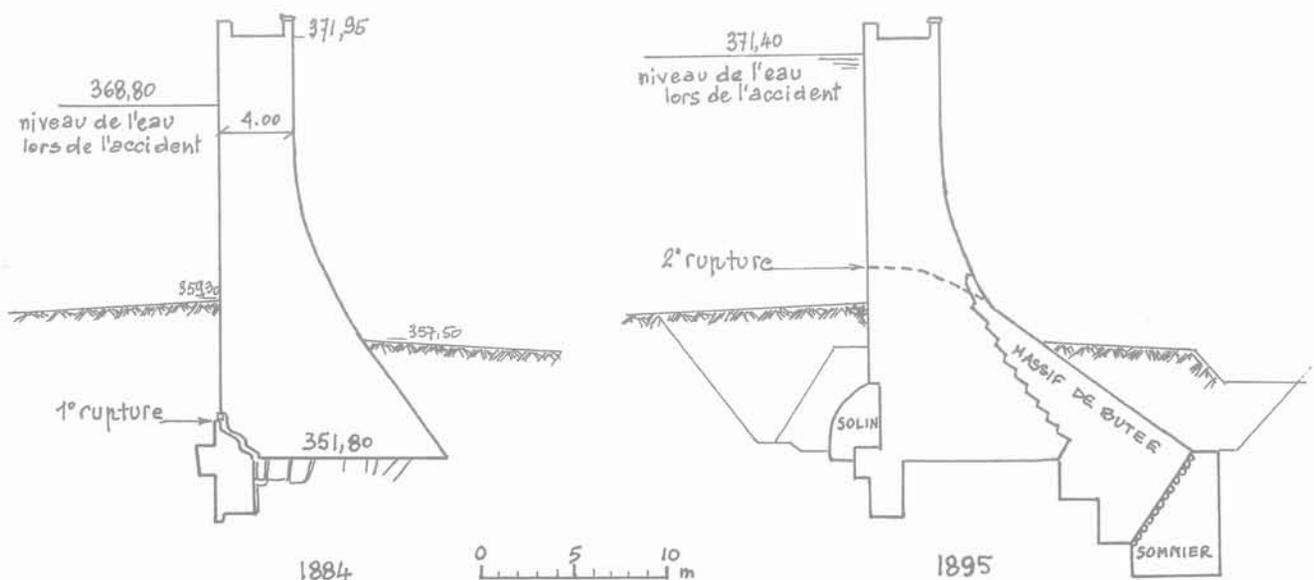


FIG. 4 Digue de Bouzey : schémas de rupture.
Bouzey dam, rupture sketches.

dière sans soupape de sûreté, et le seul remède radical consisterait, je crois, à leur donner désormais l'équivalent de cet appareil.

« Parmi les moyens que l'on peut imaginer dans ce but, j'ai pensé au suivant » ; suivait alors la description du masque qu'il proposait.

Dans la suite des développements techniques dans le cadre de l'analyse de la catastrophe, l'accent ne fut pas mis sur le drainage. On doit noter que Lévy lui-même, après avoir souligné l'importance de la pression de l'eau dans les fissures, s'est ensuite attaché à la détermination des contraintes de cisaillement. Il ne s'est guère non plus attardé sur le problème de la pression de l'eau dans les fissures lors du procès de Bouzey, auquel il fut appelé pour témoigner.

Le problème de la fondation ne fut pas traité, alors que les premiers ennuis observés à Bouzey en 1884 étaient la conséquence d'une stabilité insuffisante des fondations qui avaient été diminuées par des sous-pressions. Celles-ci résultaient de l'existence de sources dont l'aveuglement dans la fondation du parafouille amont avait été difficile et, en définitive, infructueux.

L'administration française, par la décision ministérielle du 10 mars 1896, retiendra seulement qu'il faut éviter les fissures de traction dans les parements amont des barrages. Elle imposera donc la condition de non-extension sur le parement amont et, à ce titre, la vérification de tous les barrages existants. Cette condition était moins sévère que celle de Lévy. En conséquence, lorsque celle-ci n'a pas pu être vérifiée, un certain nombre de masques de Lévy furent exécutés (La Mouche, les Settons). Or la condition de non-extension avait été recommandée dès 1872 par Rankine en Grande-Bretagne⁽¹⁴⁾. En France, dans des articles dans les *Annales des ponts et chaussées*, Clavenad en 1887 et Pelletreau en 1892, avaient également souligné les risques de l'existence de zone de traction dans les barrages. Elle avait été considérée comme une simple précaution et non une obligation jusqu'en 1896 en France.

Dans la circulaire du 15 juin 1897 prescrivant les conditions de vérifications des barrages dépendant du ministère de l'Agriculture, on pouvait lire :

« On déterminera avec le plus grand soin et par les procédés qui seront jugés les plus convenables, le poids du mètre cube de la maçonnerie sèche.

« C'est ce poids qui servira à calculer le travail des maçonneries à vide.

« On le diminuera de 100 kg pour le calcul de la maçonnerie en charge, afin de tenir compte de l'effet nuisible que peuvent produire les eaux qui s'infiltreront dans la maçonnerie et viennent suinter sur le parement aval. »

En fin de la circulaire, on trouvait néanmoins :

« **Cas particuliers** : Les formules qui précèdent supposent que l'on n'a pas d'autre sous-pression à craindre que celle que peuvent produire les eaux qui s'infiltreront dans la maçonnerie et viennent suinter sur le parement aval et, s'il en était autrement, on aurait à tenir compte des sous-pressions spéciales qui seraient susceptibles de se produire.

« Si, par exemple, le sol de fondation était perméable, l'eau en mouvement qui le traverserait exercerait sur la base du barrage une sous-pression qui ne changerait pas du travail de la maçonnerie dans le massif du barrage, mais qui modifierait l'effort transmis par ce massif au sol de fondation, et on aurait à tenir compte de cette sous-pression pour déterminer les efforts supportés par le sol de fondation, et s'assurer que le barrage n'est pas exposé à glisser sur ce sol. »

Il y a derrière cette formulation toujours l'idée qu'une fondation imperméable empêche les sous-pressions de se développer alors qu'une fondation perméable est le siège de sous-pressions. Cette idée était partagée par tous les ingénieurs à l'époque.

On peut lire par exemple dans le rapport du 29 juillet 1895 de la Commission spéciale du ministère des Travaux publics sur la rupture du barrage de Bouzey⁽¹⁵⁾ :

« Effets d'une sous-pression à la base du mur.

« Les calculs qui précèdent supposent que l'eau ne pénètre pas dans le sol de fondation et dans la maçonnerie.

« Mais il peut n'en être pas ainsi et, si le sol de fondation est perméable, l'eau qui le traversera, exercera sur la base du mur une sous-pression qui aura son point d'application en k. »

Et en rappel de l'accident de 1884, on lit dans le même rapport :

« La Commission (celle de 1884) a reconnu... et que l'accident devait être uniquement imputé à la nature du terrain et principalement aux sous-pressions résultant de la perméabilité du sol de fondation. »

L'idée de s'opposer en force aux effets de l'eau demeurait fût-ce de façon inconsciente. L'existence de l'écoulement de l'eau au contact du corps du barrage et de sa fondation en rocher quelle que fut l'imperméabilité, n'était toujours pas admise avec la conséquence des sous-pressions induites sur l'équilibre du corps du barrage.

Les enseignements à tirer des deux accidents de la digue de Bouzey n'étaient pas complets, et ceux des autres accidents plus ou moins occultés. Ce n'est qu'avec le temps qui apportera de nouvelles observations que toutes les leçons seront tirées.

5

Le drainage des fondations de barrage en maçonnerie

Les Anglais construisirent le barrage en maçonnerie de Vyrnwy⁽¹⁶⁾, de 1882 à 1890, pour l'alimentation en eau de Liverpool. Celui-ci avait une capacité de 55 millions de mètres cubes et une hauteur de 49,10 m au-dessus des fondations.

⁽¹⁴⁾ Rankine W.J.M., « Report on masonry dams », *The Engineer*, vol. 33, 1872.

⁽¹⁶⁾ Davidson I., « Georges Deacon (1843-1909) and the Vyrnwy works », *Transactions, Newcomen Society*, vol. 59, 1987-1988.

⁽¹⁴⁾ Rankine W.J.M., « Report on masonry dams », *The Engineer*, vol. 33, 1872.

Au cours des études, le profil du barrage fut épaissi. Il avait été initialement dessiné en référence aux critères français qui admettaient alors encore des tractions. En 1872, Rankine avait insisté sur la nécessité qu'aucune contrainte de traction ne se développe. En 1881, alors que les plans étaient terminés, le barrage de l'Habra se rompit à la suite d'une surcharge due à la surélévation du niveau de la retenue résultant d'une capacité insuffisante de l'évacuateur qui provoqua la submersion de la crête.

Hawksley, ingénieur conseil du barrage associé à Georges Deacon, (1843-1909) maître d'ouvrage, aurait été informé du mécanisme de rupture de l'Habra et de l'importance de la sous-pression par ses relations en France. Mais la liaison reste encore à prouver. Les historiens anglais n'ont pas d'éléments précis sur les contacts qui auraient eu lieu. Deacon, plus au fait qu'Hawksley des problèmes des barrages en béton, proposa d'annuler les sous-pressions par un réseau de drains verticaux dans la fondation, reliés à une galerie située au niveau des eaux à l'aval. Pour les calculs de stabilité, il retint une hypothèse de répartition des sous-pressions tout à fait convenable. La figure 5 montre les diagrammes correspondants. A titre de comparaison, on a rassemblé les hypothèses utilisées par les projecteurs des barrages en maçonnerie au cours du XIX^e siècle. Un croquis rappelle le calcul de Bonnetat de 1838 qui fut celui appliqué au barrage de Gileppe. Enfin, on a indiqué les hypothèses prises en compte de nos jours. Il semble que la démarche du projecteur de Vyrnwy n'ait pas été comprise, aussi bien en Angle-

terre qu'à l'étranger. Dumas, dans ses articles dans le *Génie civil* de 1892, consacrés à ce barrage, ne parle pas du système de drainage, pas plus que dans sa grande étude sur les barrages réservoirs de 1895.

C'est au seul corps du barrage que s'intéressèrent Pelletreau et Bellet dans l'esprit défini par Lévy, c'est-à-dire le drainage de fissures sur le parement amont.

Les Allemands s'appuyèrent sur les rapports de la catastrophe de Bouzey pour modifier la conception du barrage d'Alfeld (1883-1888) en y adossant, en 1897, une recharge en enrochements à l'aval. Mais ces derniers, en 1883, avaient déjà tenu compte d'une sous-pression sous la fondation variant dans le plan d'un joint horizontal de façon linéaire de l'amont vers l'aval (Fig. 5). Ce ne fut publié qu'en 1889⁽¹⁷⁾. L'idée était dans l'air. Les Belges avaient calculé le barrage de Gileppe (1875) en tenant compte d'une hypothèse excessive en supposant une sous-pression uniforme égale à la charge de la retenue sous toute la fondation du barrage, comme l'avait admis Bonnetat en 1838 comme hypothèse extrême.

En Allemagne avec O. Intze (1843-1904), on trouve un nouvel exemple de rideau de drainage dans le corps du barrage de Urft, bâti de 1901 à 1904, puis en Australie avec le barrage de Cataract (1902-1907) et aux États-Unis avec le barrage d'Olive Bridge à Ashokan (1908-1914).

⁽¹⁷⁾ Fecht H., *Anlage von Stauweihern in den Vosgesen, Bau des Stauweihers im Alfeld*, Zeitschrift Bawesem, Verlag von Ernst & Korn, Berlin, 1889.

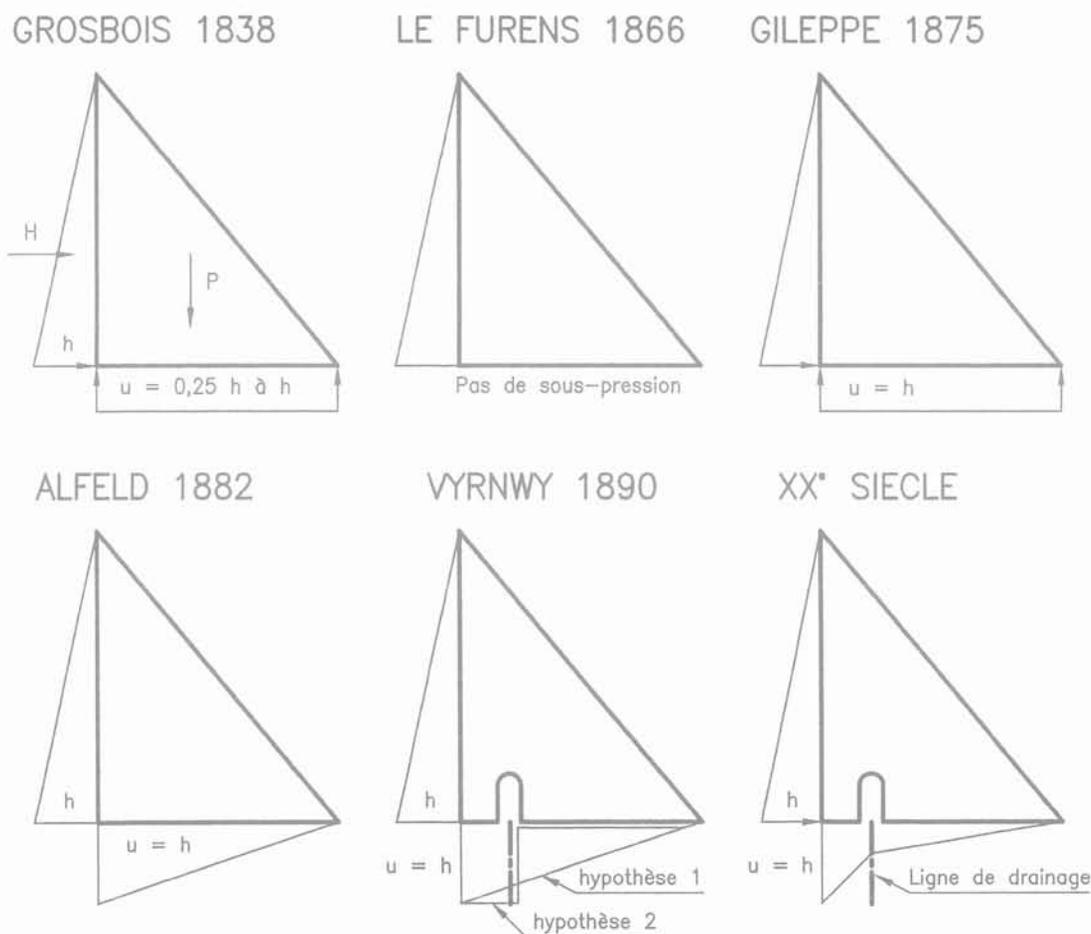


FIG. 5 Évolution des hypothèses de pression de l'eau, u , à l'interface du corps du barrage et de la fondation. Various assumptions of water pressure, u , along dam and foundation interface.

Enfin, les fondations du barrage d'Elephant Butte (1902-1916) et d'Arrow Rock (1912-1916), encore aux États-Unis, sont drainées par un rideau de forages verticaux.

Le barrage d'Éguzon, construit de 1920 à 1924, sera le premier en France, réalisé avec un rideau de drainage. La circulaire ministérielle de 1923 prendra pleinement en compte le problème des sous-pressions avec des commentaires extrêmement détaillés, en reprenant les termes mêmes de Lévy sur la nécessité d'annuler les sous-pressions.

Le texte ministériel faisait référence aux barrages américains, cités plus haut, qu'avait visités une mission française.

Toutefois Wegman, dans l'édition de 1928 de son traité *The design and construction of dams* (p. 50), tout en recommandant le drainage du corps du barrage et des fondations, posait la question de l'efficacité de tels dispositifs. Ce n'était que la suite de longues discussions, dont la revue *The Engineer* s'était fait l'écho trente ans plus tôt, en 1895. Au siège de l'ASCE à New York, au cours d'une réunion, il avait été affirmé que les ruptures des barrages de Puentes, l'Habra et Bouzey n'étaient pas dues à des erreurs de conception mais à des fautes d'exécution. La prise en compte d'une sous-pression au contact barrage fondation rencontrait beaucoup de réticences de la part des membres présents qui ne croyaient pas à la réalité physique du phénomène, lorsque le contact était bien assuré. Il faudra encore de nombreuses mesures pour que l'évidence s'impose.

6

La notion de pression interstitielle dans les sols

Il avait fallu plusieurs accidents, une rupture et des dizaines d'années de réflexion, pour que soit plus ou moins bien accepté le concept d'une rupture sur un plan horizontal le long duquel la résistance au cisaillement soit réduite par la pression de l'eau qui s'écoule entre le corps du barrage et la fondation. Il faudra encore longtemps pour que ce concept soit étendu aux milieux fissurés en général. Pour les milieux plus continus comme les sols, les choses n'étaient pas aussi avancées, malgré de nombreux accidents de talus dans les barrages en terre, qui heureusement n'avaient pas abouti à la rupture des ouvrages, du moins en France. La voie ouverte par Collin n'avait pas été explorée.

Dans le courant des années 20, peu avant que Terzaghi ne publiât ses travaux sur la consolidation des argiles, les plus hautes autorités techniques de l'administration française se penchaient sur un cas de rupture qui s'inscrivait dans ce que l'un de ses représentants appelait le long martyrologue des digues françaises.

La lecture des analyses et discussions à ce sujet⁽¹⁸⁾ montre que, si l'on avait la conscience exacte de l'influence de la pente des talus, de la nature des terres, du retrait, on était incapable de remonter aux causes premières en l'absence d'une théorie sur un méca-

nisme de déformation et de rupture qui prenait en compte tous les paramètres et, en particulier, l'effet de l'eau. Bien plus, certaine idée fautive demeurait dans l'esprit des techniciens comme celle de l'imperméabilité absolue d'un corroi argileux « égale à celle d'une feuille de métal ». Ce n'était que l'équivalent de celle qui prévalait pour les fondations de barrages établis sur le rocher considéré comme imperméable. Frontard (1884-1962) qui, depuis la rupture du barrage de Charmes⁽¹⁹⁾ sentait le rôle mécanique de la pression de l'eau, envisageait alors de faire des petits forages dans le corroi d'une digue pour vérifier qu'un niveau d'eau pouvait s'y établir et se faire comprendre de ses contradicteurs. Quatre-vingts ans après le travail de Collin, les idées n'avaient que très peu évolué.

En même temps qu'il montrait l'importance de la cohésion et des caractéristiques « élastiques » des sols, Terzaghi⁽²⁰⁾ établissait que les sollicitations extérieures qui s'exercent sur un massif saturé d'eau se répartissent 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.

La méthode de travail de Terzaghi mérite d'être soulignée. En 1927 il écrivait⁽²¹⁾ :

« 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.

« ... L'essentiel de ce travail, l'accumulation systématique de résultats empiriques, reste à faire. »

C'était une démarche identique à celle qu'avait suivie Collin, et 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.

⁽¹⁸⁾ Frontard J. « Notice sur l'accident de la digue de Charmes », *Annales des ponts et chaussées*, vol. 23, 1914.

⁽²⁰⁾ Skempton A.W., *Terzaghi's discovery of effective stress, From theory to practice in soils mechanics* (ed. Bjerrum, Casagrande, Skempton), New York, J. Wiley, 1960.

⁽²¹⁾ Terzaghi K., « La science des fondations. Son état actuel, son avenir », communication à la Société des ingénieurs civils américains, *Technique des travaux* vol. 4, vol. 5, 1929, traduction des *Proceedings ASCE*, vol. 53 et 55, 1929.

⁽¹⁸⁾ Archives de la DDE de la Côte-d'Or, « Contre-barrage de Grosbois, correspondance Frontard-Galliot, 1922 », rapport de commission au Conseil général des ponts et chaussées, séance du 15 juin 1922.

Génie civil et méthodologie

L'apport de Terzaghi permettait de comprendre enfin que l'imperméabilité d'un milieu qui n'était toujours que relative, n'excluait pas l'existence de pression dans les pores de ce milieu, et la diminution en conséquence de sa résistance.

La vision subjective qui semble ne pas manquer de bon sens, il n'y a de sous-pression que là où l'eau circule, avait égaré les esprits. C'était le cas de Beaudemoulin qui s'imaginait que la barrière imperméable résultant de la migration des particules fines dans les alluvions stoppait tout écoulement. De Grosbois à Bouzey, c'était la croyance qu'une bêche suffisamment profonde atteignant un substratum imperméable coupait toute communication et donc empêchait le développement de sous-pressions à l'aval.

Les ingénieurs étaient conscients de la nécessité de comprendre pour aller de l'avant. Le nombre et la conséquence des accidents sont là pour rappeler le coût de l'ignorance.

Mais le problème de l'écoulement de l'eau dans les sols et de ses effets, mettait en jeu des connaissances scientifiques relevant de la mécanique des fluides, de la mécanique des milieux continus dont la théorie de l'élasticité, mais aussi les mécanismes de la rupture et les lois de comportement des matériaux avant la rupture.

Il requérait des connaissances pratiques de la fabrication des matériaux en usine ou en place, des moyens pour la détermination de leur propriété, pour la reconnaissance des sols et roches de fondations, des instruments pour le recueil de données d'observations et de mesure du comportement des ouvrages, toutes choses qui n'existaient pas ou qui en étaient à leurs balbutiements.

Les travaux de barrage au XIX^e siècle, comparés à ceux entrepris dans les ports ou pour les chemins de fer, ont été modestes. On a construit en moyenne un grand barrage tous les trois ans en France, qui était le pays qui en totalisait le plus grand nombre en Europe à la fin du XIX^e siècle derrière l'Angleterre. Ceci n'est pas la moindre des raisons de la lenteur des progrès.

La construction d'un modèle explicatif devant se faire à partir d'une observation rigoureuse des phénomènes naturels, Dubuat, le père de l'hydraulique, écrivait, en 1786, dans la préface de la première édition de son traité d'hydraulique :

« Nous raisonnons juste quand nous n'appliquons à un sujet que les idées qui sont prises dans la nature des choses ; mais on donne au contraire dans toutes sortes d'erreurs, quand on se préoccupe en voulant conclure avant de raisonner, raisonner avant de connaître, et connaître avant d'avoir examiné. »

Les progrès, disait-il encore seraient alors fonction du soin apporté à observer, pour autant que la mesure des phénomènes soit faite à l'échelle nécessaire. Collin faisait écho à Dubuat dans la préface de son ouvrage sur les glissements, en écrivant soixante ans plus tard :

« La nécessité de reconstituer sur d'autres bases, la théorie du mouvement des terres étant admise, nous trouvons devant nous deux routes pour nous conduire au but : la méthode syllogistique et la méthode inductive. Nous n'avons point hésité à nous engager dans la

seconde. C'est comme personne ne l'ignore et nonobstant les prétentions contraires de l'École cartésienne, à la méthode expérimentale que l'on doit les immenses progrès dans l'étude des phénomènes naturels, les découvertes de Galilée, de Torricelli, de Newton et de leurs successeurs...

« C'est par l'association de l'induction et du syllogisme que la science peut prospérer : l'exclusion de la méthode expérimentale, qui semble décrétée par quelques géomètres n'aboutirait qu'à la propagation de l'erreur. »

En avance sur la méthodologie qui sera préconisée par Terzaghi, Collin annonçait un travail long et laborieux :

« Nous devons en terminant, prévenir les lecteurs qu'ils trouveront dans ce mémoire tout ce qu'ils y chercheront, c'est-à-dire, une théorie basée sur ces nouveaux principes. Avant d'arriver à ce résultat, il faudra faire faire des expériences nombreuses et surtout précises pour déterminer la loi des variations d'une force que l'on a négligée jusqu'ici, la cohésion. »

Les praticiens rencontraient de multiples difficultés : absence d'outils théoriques, manque de mesures, échelle des temps des phénomènes à observer très étendue, réticence devant la méthodologie à suivre. Les premiers laboratoires d'essais des matériaux ne furent pas créés avant 1850.

Ceci explique les pertes de mémoire, les fausses interprétations, les rapprochements qui ne furent pas faits. Ce ne sont pas pourtant les monographies sur les ouvrages qui manquaient. Les conditions d'exécution, leurs incidents et le comportement en service ont été rapportés souvent de façon très détaillée. Mais sans théorie d'ensemble et sans mesures fiables, la mémoire ne retient que des faits anecdotiques.

Coulomb, Prony, Beaudemoulin, Collin avaient implicitement posé le problème des effets mécaniques internes de l'eau. Lorsque Minard décrit l'action de la pression de l'eau dans une fondation de marne fissurée à la suite du calcul de Bonnetat et des questions posées par le comportement de Grosbois, on s'attend à une poursuite de la réflexion. Les publications de Beaudemoulin des années 1830 avaient apporté des éléments fondamentaux de réflexion. En 1853, le problème de la stabilité d'un barrage, jusque-là posé en terme de calcul à la rupture, dans lequel la sous-pression de l'eau avait tout naturellement sa place, appliquée aux limites du corps rigide dont on vérifiait l'équilibre, devient un problème où l'eau est réduite à l'expression de sa résultante sur le parement amont du barrage, dans lequel on calcule le niveau de contrainte en référence à une valeur considérée comme admissible.

Cette vision élasticienne est réductrice. L'eau n'existe alors que comme un fluide qu'il faut contenir : étouffement des sources, obturation des fissures dans le rocher de fondations en amont du mur du barrage. Le développement des ciments, à partir de Vicat, conduisait à croire que l'on possédait les moyens de fabriquer un matériau à la fois imperméable et résistant à la traction.

Mais c'était oublier les deux termes du problème, pression et débit. A force de réduire le débit, on faisait monter la pression et pas forcément là où il fallait.

Toutes les réflexions et efforts se sont concentrés sur l'objet le plus facile à modéliser et donc à maîtriser, le barrage en maçonnerie, parce que fait de la main de l'homme.

Dans le domaine des fondations tout particulièrement, l'ingénieur doit observer avant d'agir, et vérifier ensuite, au fur et à mesure, les effets de son action, comme le préconisait Dubuat. Cette démarche constitue d'ailleurs, de nos jours, une des méthodes de conception dans le domaine géotechnique appliqué au génie civil.

Le modèle explicatif, fruit de l'observation, est soumis ensuite à l'épreuve de l'expérience par des mesures continues sur l'ouvrage réalisé. Il faut être patient et prudent, car l'accident peut survenir des dizaines d'années après l'erreur. Des années de suivi sont nécessaires pour comprendre les mécanismes de comportement d'un ouvrage. Le temps est un paramètre, dont on ne connaît pas *a priori* le poids.

Pour progresser dans la maîtrise des sciences de la nature, c'est l'esprit de finesse défini par Pascal qui compte avant l'esprit de géométrie. L'opposition entre Poncelet et Collin est à ce titre exemplaire. Ce fut le défaut d'une certaine formation française lié à une trop grande pratique des mathématiques, que les Anglais, par exemple, ne manquèrent pas de faire remarquer, spécialement lors des accidents.

Tout dans un barrage, en effet, ne se calcule pas. On vérifie sa stabilité en imaginant des modes possibles de déformation et de rupture. Cette vérification ne vaut que par les hypothèses, sur les données géologiques, géotechniques, hydrologiques, et par la modélisation mécanique retenue, fruit du raisonnement et de l'expérience.

L. Giuliani, en 1973, analysant cette méthodologie très particulière, en un domaine où l'expérimentation préalable est impossible, en montrait la difficulté⁽²²⁾ :

« On en saisit aussitôt la limite ; si l'on ne trouve que ce que l'on cherche, si l'on ne cherche que ce que l'on soupçonne, si l'on ne soupçonne que ce que l'on sait déjà, le moment doit venir où, à défaut d'expérience déjà faite, seul l'événement peut instruire... Il ne faudrait pas conclure que la technique des constructions ne fait de pas décisifs qu'à coup de catastrophes. Heureusement, les semonces de la Nature ne sont le plus souvent que des annonces détectées par de fines mesures, les accidents ne sont que des incidents, perçus des seuls techniciens, sans conséquence pour les personnes et les biens. »

Les techniques d'auscultation répondent au souci de mieux entendre les semonces de la Nature qui passeront inaperçues à l'Habra comme à Bouzey. Elles étaient rudimentaires au XIX^e siècle. Mais le barrage de Grosbois fut l'objet d'un suivi topographique dès 1853. L'auscultation avec l'instrumentation, qui lui est associée, est, de nos jours, un des outils majeurs du contrôle de la sécurité des grandes infrastructures de génie civil, et un des moyens d'une connaissance toujours plus fine des structures.

Dans ces conditions, la diffusion de l'expérience apparaît à la fois comme une nécessité et une obligation. Le champ d'activité est étroit, l'échange entre tous les acteurs doit se faire bien au-delà de toutes les frontières. En France, la pratique s'est établie spontanément, d'abord de façon empirique par l'envoi de nombreuses missions en Angleterre et aux États-Unis au début du XIX^e siècle. Après 1880, de façon de plus en plus institutionnelle, avec les congrès organisés par les sociétés savantes, les échanges se firent encore plus fréquents.

⁽²²⁾ Giuliani L., « Technique et morale », Symposium national, sol et sous-sol et sécurité des constructions, organisé par le BRGM, le CFMS et le CFGI, 1973.

Parallèlement, les publications techniques se multipliaient. La revue du *Génie civil* fut fondée en 1880. Le nombre des périodiques reçues à la bibliothèque de l'École des ponts et chaussées s'élevait à 12 en 1840, 32 en 1860, 50 en 1880, 97 en 1900 soit un doublement entre 1880 et 1900, dont 30 % de publications étrangères.

Mais le risque de perdre le bénéfice des leçons de l'expérience n'est pas évité pour autant. Il ne suffit pas qu'un homme ait compris. La compréhension doit être celle de toute une communauté technique, afin que toutes les pratiques soient modifiées en conséquence. Des décennies peuvent être alors nécessaires pour progresser. Les débats auxquels ont donné lieu la catastrophe de Bouzey montrent toute la difficulté à comprendre, alors que les moyens d'informations, à la fin du siècle, étaient déjà très développés.

L'oubli jusqu'à nos jours, dans lequel sont tombés les travaux ou analyses de Collin, Bonnétat, Beaudemoulin, ou la lecture incomplète de Lévy montrent toute la difficulté d'une communauté technique à faire sienne l'expérience de ses membres et à en garder la mémoire.

Le Conseil général des ponts et chaussées qui jouait un rôle très efficace dans la diffusion de la connaissance technique au XIX^e siècle, n'a pas réussi dans un domaine qui relevait aussi des mentalités.

Conclusion

La complexité du modèle polyphasique à élaborer, exigeait que des progrès dans des domaines connexes fussent accomplis en parallèle, comme cela est de règle dans l'évolution de tout système technique.

La référence aux données de l'observation était le fondement et la condition de toute avancée. Ceci ne fut pas admis autant qu'il aurait fallu. Les observations sur le comportement des ouvrages existants, réalisées seulement à quelques dizaines d'exemplaires en Europe au XIX^e siècle, furent difficiles à faire, à réunir et à transmettre. L'analyse des accidents, forme extrême de pathologie, ne fut pas forcément plus porteuse d'enseignements que celle des mesures recueillies patiemment sur de longues périodes.

La difficulté à accepter les faits à travers des mesures souvent disparates, par une partie significative de la communauté technique, et les pertes de mémoire furent quelques-unes des raisons du frein au développement des connaissances. L'obligation de se référer à l'observation des ouvrages reste une leçon toujours actuelle.

REMERCIEMENTS

L'auteur tient à remercier tout particulièrement J. Biarez, professeur de mécanique des sols à l'École centrale de Paris et S. Benoit, professeur agrégé à l'université d'Évry, pour les nombreuses suggestions et remarques qu'ils lui ont faites au cours de l'élaboration de cet article.

NDLA : Les références infra-paginales ne concernent qu'une faible partie de celles qui ont servi pour la rédaction de cet article et que l'on pourra retrouver, dans une thèse consacrée aux barrages réservoirs en France de 1750 à 1920, qui sera soutenue à Paris I, fin 1999 début 2000.