

# VI

## Rapport Général.

Generalreferat

General Report.

F. Campus,

Professeur à l'Université de Liège, Directeur du Laboratoire d'essais du Génie Civil.

L'application du béton et du béton armé aux travaux hydrauliques embrasse un domaine qu'un rapport général suffisamment concis ne pourrait explorer complètement, même d'une manière approximative. Il m'a paru raisonnable de ne pas le tenter et de m'autoriser du programme de travail du Congrès pour m'attacher principalement à exposer un bref résumé des différents rapports figurant dans la publication préliminaire. Je me permettrai, chemin faisant, d'alléguer quelques opinions personnelles à titre de contribution à la discussion, en me réjouissant de pouvoir être, en règle générale, sincèrement d'accord avec les éminents rapporteurs. Je ne puis croire que ce soit là l'effet des relations particulières que je m'honore d'entretenir avec la plupart d'entre eux et qui se sont nouées au cours de Congrès antérieurs. La lecture attentive des six mémoires qu'ils ont rédigés m'a confirmé, d'une manière plus évidente encore que précédemment, dans l'impression, que j'avais déjà formulée dans des Congrès précédents, de l'unité foncière de la technique dans les divers pays, du moins du continent européen. Je me plais à croire qu'il faut y voir la conséquence de la multiplication des Congrès techniques internationaux et que cela suffit pour réfuter les critiques que l'on exprime parfois à leur sujet. Cela suffit aussi pour permettre de croire qu'il faut maintenir la périodicité de ces réunions, même si à la longue leur intérêt pouvait devenir moins sensationnel. En étudiant les rapports dont je vais entreprendre le résumé, j'ai éprouvé le sentiment que l'absence de proprement sensationnel résultait de la modestie de leurs auteurs et était très avantageusement compensée par le caractère foncier, approfondi, atteignant à la maîtrise et confinant souvent au raffinement, de ces travaux, dont l'intérêt s'avère considérable.

Parmi les ouvrages hydrauliques auxquels s'applique le béton armé, il était naturel que les barrages fussent en situation prédominante, tant par leur importance que par le caractère de difficulté et de responsabilité qui s'y attache. Le professeur Dr. Ing. A. Ludin a fait de « L'emploi du béton en Allemagne dans la construction des grands barrages » un exposé dont la perfection est toute naturelle pour ceux qui connaissent son traité « Die Wasserkräfte », sans parler de ses autres travaux. Depuis 1922, dix barrages-poids en béton ont été construits

ou entrepris, dont trois atteignent ou dépassent 60 m de hauteur. Un seul barrage à voûtes multiples, de hauteur modérée, a été construit en béton armé. Plusieurs barrages en terres et enrochements ont reçu des masques d'étanchement internes en béton, parmi eux le barrage de la Sorpe, qui est le plus élevé des ouvrages européens de ce type (62 m de retenue). La description des barrages-poids, les détails d'exécution, les constatations faites en exploitation et les observations du rapporteur au sujet de leur évolution corroborent les tendances générales de la technique européenne. On peut les caractériser comme suit :

- a) abandon du béton fluide en faveur du béton « mou », semi-fluide, très plastique, quoique non damé ;
- b) évolution des granulométries dans le sens d'une augmentation du calibre maximum des pierrailles, d'une moindre quantité de sable, d'une granulométrie discontinue ;
- c) augmentation de la richesse en ciment, addition de matières hydrauliques (trass, laitier moulu) ou emploi de ciments spéciaux, en vue d'assurer une résistance plus grande aux actions agressives des eaux et aux actions atmosphériques (sur les parements découverts), une plus grande compacité, un moindre développement de chaleur et moins de retrait, etc.
- d) abandon des parements en moëllons et même des enduits ou chapes quelconques. Cependant, la technique allemande n'a pas encore, d'après le rapporteur, fait de choix définitif entre l'emploi d'un béton homogène et celui de parements en béton plus riche et plus soigné. La tendance générale, dans la plupart des pays, à l'abandon de dosages trop maigres (voir rapport de M. Coyne), tout en conservant au béton des parements un traitement parfois particulier (vibration par ex.), présage peut-être la conclusion de ce dilemme ;
- e) établissement de joints de contraction et de drainages au parement amont et dans la fondation ;
- f) mécanisation et organisation moderne des chantiers, en vue de la rapidité de l'avancement, allant jusqu'à prévoir le refroidissement du béton pendant l'exécution, comme il a déjà été pratiqué en Amérique.

A titre de remarques particulières, je signalerai :

- a) l'opportunité de tenir compte des sous-pressions, depuis longtemps mises en évidence en Allemagne par des mesures de pressions dans les fondations des ouvrages, des mesures de suintements, etc.
- b) la production de fissures de contraction dans les parties inférieures du barrage de l'Agger, de Bleiloch et de Schluchsee, où les joints de contraction assez peu écartés ne s'étendaient pas jusqu'à la base de fondation. Les ouvrages présentaient une faible courbure en plan, comme la plupart des barrages allemands, sauf celui de Zillierbach. J'y trouve une confirmation renouvelée de l'opinion que j'ai défendue que la faible courbure donnée fréquemment aux barrages-poids n'a pas, pour les parties épaisses, toutes les vertus qu'on lui a souvent accordées sans trop de raisons et qu'elle ne peut dispenser de toutes les précautions que demande ce type d'ouvrage. Par contre, le fait que les fissures du barrage de l'Agger se sont élevées de la

base seulement jusqu'à mi-hauteur<sup>1</sup> montre que la courbure peut agir utilement dans les parties les moins épaisses.

- c) l'emploi de poussier amaigrissant le ciment est reconnu défavorable, au contraire de l'addition de matières pouzzolaniques, tels que le trass d'ancienne réputation, ou hydrauliques, telles que le laitier broyé. L'addition de ce produit est encore prévue pour le plus récent barrage en construction à Hohenwarte (Thuringe). J'ai eu l'occasion de signaler au Congrès international d'essai des matériaux, en 1931, les avantages de telles additions que j'avais employées pour des fondations dans des eaux agressives. Cependant, depuis lors, j'ai abandonné ce système par suite de la production courante en Belgique de ciment métallurgique, où se trouve tout fait le mélange de portland et de laitier. L'usage semble d'ailleurs se répandre en Allemagne des ciments spéciaux: ciment-trass, ciments métallurgiques et il y a lieu de signaler comme conforme à l'évolution générale l'augmentation de la finesse de mouture, destinée à accélérer le durcissement de ces ciments et à augmenter la maniabilité et l'étanchéité des bétons.
- d) certains dosages des plus récents (barrage de la Sorpe) sont exprimés en poids et non, comme d'usage en Allemagne, en volume. Partisan de cette méthode en vue de la régularité du béton, je présume que ce changement est aussi considéré en Allemagne comme un progrès pratique.

M. A. Coyne, ingénieur en chef des Ponts et Chaussées à Paris, directeur des travaux du barrage de Marèges, en France, le plus grand barrage-voûte européen (90 m de hauteur et 247 m de développement en crête) intitule modestement son rapport: «Remarques sur l'emploi du béton dans la construction des barrages massifs.» En réalité, ce travail constitue un rapport général, comme j'eusse souhaité pouvoir le faire. On conçoit qu'il est difficile de le résumer. C'est l'exposé remarquablement lucide d'un praticien dont la maîtrise est basée sur une formation élevée. Se bornant à traiter du béton comme matière à faire les barrages, M. Coyne en expose l'emploi comme un sculpteur celui de la glaise, en maître. Il explique, commente et formule des règles dont certaines, selon le rapport précédent, paraissent constituer aussi la leçon des expériences allemandes. Adoption des bétons mous (non fluides); importance de la maniabilité pour «l'automatisme» de la mise en oeuvre; dosages suffisamment riches en vue de la durabilité; ciments spéciaux à faible développement de chaleur et peu attaquables par les eaux; vibration, surtout près du parement amont, comme appoint à la bonne mise en oeuvre du béton mou; granulométrie convenable, dans certains cas discontinue; refroidissement artificiel, telles sont les directives actuelles principales que M. Coyne préconise. Le dosage en poids recueille aussi ses préférences. Pour ma modeste part, je ne pourrais assez appuyer ses observations sur le danger des reprises et le soin à apporter à leur confection, moyennant quoi il est possible de les réussir. Et aussi ses conseils sur le contrôle en oeuvre, effectué sur des éprouvettes retirées de l'ouvrage (en faveur duquel je me suis exprimé au Congrès international d'essai des matériaux à Zurich en 1931) et sur le contrôle de la densité du béton frais, ainsi que de la résistance du mortier pris dans le béton (selon Bolomey).

<sup>1</sup> Rapport préliminaire, figure 8, page 1227.

A noter aussi ses remarques pénétrantes, fruits précieux de son expérience réfléchie, sur le danger des fissures longitudinales, sur le mécanisme de l'étanchéité et du colmatage, notamment biologique, et sur les dégradations des bétons, ainsi que sur leur résistance considérable à l'érosion lorsqu'ils sont compacts et lisses. Partisan avéré des barrages en voûtes, *M. Coyne* n'aborde pas dans ce travail la question des formes des barrages, mais il signale en passant une faiblesse des barrages-poids, l'exclusivité presque complète des dégradations climatiques du béton, à cause de la pauvreté en ciment des dosages usuels des barrages en béton non armé.

*M.* le Professeur *Zd. Bažant*, de l'École polytechnique tchèque de Prague, a fait un magistral exposé du « Développement du calcul des barrages arqués ». Le point de vue de l'application du béton ne prédomine pas cette étude, quoiqu'il n'en soit pas absent, par suite de la nécessité de tenir compte, dans le projet et le calcul des barrages arqués, des conditions de mise en oeuvre et des propriétés mécaniques et physiques du matériau: retrait, faible résistance à l'extension, nécessité locale d'armatures, joints de contraction, etc. Le rapporteur, après avoir constaté l'origine européenne des barrages modernes en voûtes et justifié leur faveur et leurs éléments de supériorité sur les barrages-poids d'une manière que le rapporteur précédent, *M. Coyne*, ne démentirait pas, analyse le développement progressif des méthodes de calcul, qui se succèdent comme suit:

- a) la voûte est considérée comme formée d'arcs indépendants résistant seuls à la pression hydrostatique;
- b) à l'action précédente s'ajoute une action de résistance par le poids des éléments verticaux du barrage, considérés comme encastrés à la base;
- c) la voûte est une enveloppe courbe.

La dernière méthode, théoriquement la plus exacte, n'a guère dépassé le stade des équations infinitésimales; elle est impraticable, de l'avis du rapporteur. Les deux précédentes comportent des modalités très variées, depuis les plus simples (pour a, la théorie de la paroi cylindrique mince) jusqu'aux plus compliquées (pour b, la « trial-load method » des Américains). Toutes sont inexactes en théorie, disons plutôt approximatives. Le rapporteur se borne, avec raison, à exposer très clairement et en détail ce laborieux développement. *M. Coyne* me permettra d'évoquer ici ses opinions sur ces théories et une méthode encore différente qu'il préconise, qui tient de la méthode a), dans laquelle les voûtes résistantes ne sont pas indépendantes, mais limitées à des surfaces isostatiques, ayant une allure générale des voûtes inclinées et résistant à la fois comme voûtes et comme arcs-boutants à la pression hydrostatique.

Cette méthode inédite, je pense, et de ce fait inconnue de *M. Bažant*, a été appliquée à la vérification du grand barrage de Marèges. J'espère que cette indiscretion incitera *M. Coyne* à satisfaire prochainement la curiosité que j'aurai éveillée.

C'est un des principaux collaborateurs de *M. Coyne*, *M. Mary*, ingénieur des Ponts et Chaussées à Paris, qui a bien voulu établir un rapport d'intérêt remarquable, tant par son objet que par sa valeur documentaire, sur « Le fretage des conduites forcées de l'usine hydroélectrique de Marèges ». Il a écrit ainsi un des plus curieux chapitres de la relation de cet ouvrage de Marèges, dans lequel

l'emploi du béton a donné lieu à des merveilles d'ingéniosité. Il s'est agi essentiellement de réaliser des conduites en béton armé de 4,40 m de diamètre intérieur, devant résister à une pression hydraulique interne de 102,50 m d'eau (10,25 atm.) sans dépasser une épaisseur de 0,40 m. Cela en toute sécurité et d'une manière étanche naturellement. La solution a consisté à fretter le tube en béton par des câbles formant armature circonférencielle préalablement mis sous tension. L'idée des contraintes initiales n'était pas originale, mais l'application à une conduite réalisée en souterrain l'est. La hardiesse de l'exécution est de telle nature que des expériences préalables étaient nécessaires. Elles ont à la fois prouvé l'opportunité de la solution et inspiré les moyens de la mettre en oeuvre. Les câbles, espacés de 0,50 m longitudinalement ont reçu une tension préalable de 135 tonnes, après bétonnage de l'enveloppe. Le résultat a été obtenu par allongement d'un diamètre du câble au moyen de deux vérins opposés, accrochés aux parois en béton du tube. Les câbles déformés ont été bloqués au moyen de mortier de ciment fondu dans des alvéoles ménagées pour permettre la déformation. Les tubes ne comportent au surplus que quelques armatures locales.<sup>2</sup> Des mesures de tensions internes par les témoins sonores de *M. Coyne* ont prouvé le succès de la construction. Le rapport décrit toutes les phases de l'étude et de l'exécution, ainsi que les résultats atteints avec la conscience qui caractérise son auteur et qui lui vaudra la reconnaissance de tous ses lecteurs.

Abandonnant le domaine des barrages et installations connexes, en lisant le rapport de *M. le Professeur Ing. G. Krall* et de l'ingénieur diplômé *H. Straub* sur les « Nouvelles cales sèches dans les ports de Gênes et de Naples », on aborde celui d'autres géants de la construction, aussi redoutables pour l'ingénieur par des difficultés d'un autre ordre, résultant de la construction sous eau à grande profondeur. Pays de grands barrages bien connus, l'Italie est aussi un pays que la nature a fait maître dans le domaine des constructions maritimes. Les ouvrages décrits et expliqués par les rapporteurs sont des exemples modernes remarquables qui font honneur à leurs auteurs par la science, la précision de l'investigation et la sûreté de l'exécution. Les deux cales sèches sont identiques par leurs dimensions impressionnantes: 40 m de largeur, 14 m de tirant d'eau sous la flottaison moyenne, 9 m d'épaisseur des bajoyers, 280 m de longueur à Gênes et 350 m environ à Naples. Mais si leurs apparences sont identiques, elles diffèrent essentiellement par leur disposition, à cause du sol rocheux à Gênes et meuble à Naples. Les problèmes à résoudre dans les deux cas étaient donc conditionnés non par l'emploi du béton, mais par la nature du sol qui, de même que pour les grands barrages, selon l'opinion de *M. Coyne*, est le maître de l'ouvrage. L'emploi du béton, par sa souplesse à se prêter à toutes les créations de l'ingénieur, combiné avec une science consommée de la construction, a permis leur résolution parfaite. Le rapport de *M.M. Krall* et *Straub* est une merveilleuse démonstration moderne de l'avantage et même de la nécessité d'associer étroitement dans l'étude le calcul et le mode d'exécution des ouvrages. Pour les deux cales sèches en question, les sollicitations présentaient une importance au moins aussi considérable dans les phases d'exécution, qu'elles conditionnaient, que dans le service normal. La reconnaissance de ce principe

<sup>2</sup> Rapport préliminaire, figure 10, page 1246.

constitue l'un des plus grands progrès de la construction et les exemples que les rapporteurs en donnent sont parmi ses plus belles applications. L'exposé de principe qui en est fait sous une forme concise mais très claire se prête malaisément à un résumé, qui deviendrait forcément trop long. Dans le cas de la cale sèche de Gênes, fondée à l'air comprimé sur terrain rocheux, le problème hyperstatique principal s'est posé à propos d'une phase d'exécution très ingénieuse. Les bajoyers ont été construits d'abord à l'aide de caissons en béton armé foncés par l'air comprimé, ainsi que la paroi du fond. L'enceinte ainsi constituée a été fermée par un bateau-porte et épuisée pour bétonner le radier. Cette enceinte a dû résister pendant cette phase à une pression d'eau de près de 20 m, supérieure à celle qui doit s'exercer en service. Pour le permettre sans renforcements permanents onéreux, une disposition constructive provisoire a été prévue, faisant travailler les bajoyers comme un barrage à voûtes multiples appuyées sur des piliers contrebutés réciproquement sur les deux faces de l'ouvrage. Ceci a posé un problème statique analogue à celui des barrages-voûtes, comportant certaines complications supplémentaires, qui a été résolu d'une manière originale et élégante par le Professeur *Krall*.<sup>3</sup> Il est à noter que les déformations du sol ont été portées en compte au même titre que celles de tous les éléments de la construction. La marche du calcul est clairement exposée. Après la construction du radier, les contreforts provisoires ont été démolis. Pour la cale sèche de Naples, fondée sur terrain meuble, le problème a été différent et se rapporte à l'état final de l'ouvrage. Les bajoyers et le radier ont été construits séparément au moyen de caissons, mis en place par deux ponts-roulants de 68 m de portée circulant sur deux ponts en béton armé parallèles aux bajoyers de l'ouvrage. Après tassement indépendant des bajoyers et du radier, les joints ont été obturés au moyen du caisson-cloche. Le problème hyperstatique à résoudre a été celui de la sollicitation de la construction après la fermeture des joints, compte tenu de la déformabilité du sol de fondation. Ce problème est classique et peut être résolu par les méthodes ordinaires de la résistance des matériaux, telles par exemple qu'elles sont appliquées dans une étude récente d'un de mes élèves (Etude des constructions reposant sur un sol élastique par *F. Szeps*. Revue Universelle des Mines, mars 1936). Le Professeur *Krall* expose le principe d'une méthode très intéressante, basée sur l'emploi des ellipses d'élasticité de *W. Ritter*. L'application sûre à la cale sèche de Naples a été possible grâce à des observations faites sur la cale sèche « Prince de Piémont » à Venise, en service normal, pour déterminer le coefficient dit « de ballast » ou de déformabilité du sol. Rarement sans doute a-t-on opéré dans un tel but une expérience à aussi grande échelle, avec un résultat excellent. L'exécution a été digne de la conception esquissée ci-dessus. A noter l'emploi de béton plastique à 300 kg de ciment spécial pouzzolanique par m<sup>3</sup>, pour résister à l'action agressive de l'eau marine; l'emploi généralisé du béton pour les caissons à l'air comprimé, les profondeurs de fonçage dépassant 23 m; la construction d'une véritable cale sèche auxiliaire en béton armé pour la construction des caissons de Gênes; les ponts de service en béton armé à Naples. Bref, le rapport de M.M. *Krall* et *Straub* est une éclatante démonstration de l'universalité de l'emploi du béton et du béton armé

<sup>3</sup> Rapport préliminaire, figures 5 et 6, pages 1200 et 1201.

pour les travaux hydrauliques et maritimes, mais il faut insister en outre sur la leçon qui s'en dégage aussi de la puissance victorieuse que confère aux ingénieurs l'union de la science du calcul des constructions, de l'expérimentation et de l'expérience de l'exécution.

J'ai réservé pour la fin — last but not least — le rapport de M. le Dr. *W. H. Glanville* et de *M. G. Grime*, relatif au « Comportement des pieux en béton armé lors du battage », à cause de son caractère très particulier et moins directement accointé avec les constructions hydrauliques, en ce sens que si les pieux en béton armé sont des auxiliaires fréquents et précieux des constructions hydrauliques, la question traitée par les auteurs est sans rapport direct avec les caractères de ces constructions. Le travail n'en est pas moins d'un intérêt supérieur, tant par sa raison d'être et ses conclusions pratiques que par la maîtrise scientifique avec laquelle il a été mené et qui est l'apanage de *M. Glanville*, réputé par ses travaux sur les déformations dites plastiques ou lentes du béton, autant que de la *Building Research Station*, à l'Etat-major de laquelle il appartient.

Le rapport constitue le résumé, d'ailleurs très détaillé, de l'étude entreprise depuis plusieurs années déjà à cet Institut de recherches sur la tenue des pieux en béton armé sous les effets du battage. Il ne diffère guère d'un rapport plus complet, auquel les auteurs renvoient (*Journal of the Institution of Civil Engineers*, décembre 1935) que par l'omission d'un schéma du traitement mathématique de la question de la propagation des ondes de choc dans les pieux. Des rapports partiels ont déjà paru dans les revues anglaises et dans les rapports annuels de la *Building Research Station*. Un rapport officiel sera publié. L'étude a été faite théoriquement, sur la base d'hypothèses définies en assez bon accord avec l'expérience, puis expérimentalement, d'abord à la station expérimentale, puis sur le chantier. Il faut citer particulièrement l'emploi d'un tensomètre dynamique ultra-sensible comportant un quartz piezo-électrique à enregistrement oscillographique, ainsi qu'un accéléromètre spécial pour le contrôle des tensions maxima à la tête des pieux pendant le battage. Les praticiens savent combien, dans certaines circonstances, le battage des pieux en béton armé peut donner lieu à des difficultés; j'ai eu l'occasion d'en signaler récemment (*Annales des Travaux Publics de Belgique*, février 1935). L'étude de *M.M. Glanville* et *Grime* est une véritable révélation au sujet des grandeurs des phénomènes mécaniques qui se produisent dans les pieux sous l'effet du choc du mouton et de l'importance des tensions instantanées qui s'y développent. Les précisions théoriques et expérimentales concordantes dévoilent une quantité de particularités dont aucune notion exacte n'existait vraisemblablement. Pratiquement, une règle ancienne connue est confirmée: la supériorité des moutons lourds et la nécessité de ne pas dépasser une certaine hauteur de chute. Une autre, de non moindre importance, paraît nouvelle. Si l'on limite la tension maximum instantanée dans le pieu, en vue d'assurer sa conservation sous le battage, pour assurer le plus grand enfoncement possible, il faut coiffer la tête du pieu d'un amortisseur aussi élastique que possible sans réduire le rendement énergétique d'une manière inadmissible dans les conditions de battage considérées. Le résultat pratique essentiel est donc relatif aux amortisseurs de battage (casques élastiques). Scientifiquement, la question de la variation et de la répartition des tensions dynamiques, le plus souvent maxima

à la tête et indépendantes de la nature du sol, parfois maxima à la pointe en cas de battage très dur, est résolue. Des règles sont énoncées aussi quant à la composition du béton et les dispositions des armatures; elles correspondent à la bonne pratique, mais il est certain que beaucoup d'entrepreneurs de travaux auraient intérêt à les méditer, ainsi que les remarques judicieuses sur les précautions à prendre au battage. En tous cas, la résistance du béton des pieux lors du battage ne sera pas inférieure à 350 à 500 kg/cm<sup>2</sup>. Des abaques cotés en unités anglaises accompagnent le rapport et sont destinés à déterminer rapidement les conditions optima de battage de pieux donnés; elles ne semblent pas telles quelles applicables à des conditions continentales.

Pour terminer ce rapport général, il me reste à exprimer le plaisir considérable que j'ai éprouvé à lire les remarquables travaux dont l'honneur m'est échu de faire l'analyse, non seulement à cause de leur perfection et de leur intérêt puissant, mais encore parce que j'ai eu la faiblesse d'y trouver la confirmation des opinions optimistes que j'ai affirmées dans des rapports généraux antérieurs au sujet des progrès incessants de l'application du béton armé, en particulier dans un domaine de constructions reconnues comme étant parmi les plus difficiles de l'art de l'ingénieur. Ce progrès n'est pas près d'être épuisé; en tous cas, il n'est pas permis de douter de l'avenir des applications du béton armé. Leur ampleur devient telle qu'elle soulève des problèmes d'importance toujours nouvelle, en regard desquelles d'anciennes questions de doctrine paraissent douées d'une signification restreinte et sans effet sur le développement de la technique.