

Recherches et essais sur les bétons: surprises et problèmes rencontrés au cours des travaux de Barberine

Autor(en): **Bolomey, J.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin technique de la Suisse romande**

Band (Jahr): **71 (1945)**

Heft 15-16: **25me anniversaire du Laboratoire d'essai des matériaux de l'Ecole d'ingénieurs de Lausanne**

PDF erstellt am: **12.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-54099>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

la figure 7 ne donne que les caractéristiques des tubes extrêmes et du moyen. Il est, dans ces conditions, aisé d'interpoler les résultats pour d'autres coefficients de variation d'épaisseur des tubes.

Il est, d'autre part, intéressant de constater que les résultats de la splendide analyse de M. J. Paschoud, jointe à cette étude et traitant le même problème par des procédés mathématiques rigoureux, conduisent aux mêmes courbes de déformations, ce qui fournit un précieux élément de comparaison des deux méthodes de calcul.

Résumé et conclusion.

La présente étude s'est attachée à la détermination du régime des déformations élastiques d'un tube cylindrique de révolution, d'épaisseur variable, chargé par des forces et moments répartis uniformément le long d'une tranche circulaire libre.

Le problème a été résolu uniquement par des procédés élémentaires familiers à tout ingénieur ayant subi avec succès ses examens propédeutiques.

La méthode appliquée peut être utilisée pour traiter tous les cas que l'on peut normalement rencontrer en pratique. Elle se prête notamment à la détermination des déformations d'un tube d'épaisseur variable et de module d'élasticité variable tels qu'on en rencontre dans le cas d'objets en fonte grise ou encore en béton armé.

Au début de cette étude, il est fait allusion à une intégration au moyen d'une machine à intégrer. A ce sujet nous dirons que la partie de ce travail qui s'est révélée de beaucoup la plus laborieuse, c'était la détermination des valeurs initiales de la fonction à intégrer, tandis que l'intégration proprement dite n'était plus qu'une opération absolument aisée.

Quant au temps nécessaire pour pratiquer les calculs dont il vient d'être question, il peut être estimé comme suit :

1. Prise de contact avec le problème, préparation des schémas de calcul, tâtonnements divers	1 heure
2. Résolution de l'équation caractéristique	1 heure
3. Calcul des constantes d'intégration, d'après les équations 10	1 heure
4. Etablissement des « cames » nécessaires pour les intégrations numériques ou mécaniques	2 heures
5. Intégration de l'équation différentielle et tracé des courbes intégrales.	3 heures
6. Mise au net des résultats.	1 heure
Total	9 heures

A cela s'ajoute le temps nécessaire aux vérifications et contrôles dont l'importance dépend du degré de sûreté du calculeur ; cela conduira volontiers à un multiple du temps estimé pour les opérations proprement dites.

Signalons enfin que le problème en question ne peut être traité qu'en opérant avec grand soin et en faisant un usage continu de la machine à calculer ; la règle à calcul, même de précision, est insuffisante pour de tels problèmes,

Lausanne, juin 1945.

Recherches et essais sur les bétons

Surprises et problèmes rencontrés au cours des travaux de Barberine

par J. BOLOMEY, professeur,
ancien ingénieur-directeur des travaux des usines de Barberine
et de Vernayaz ¹.

Introduction.

Les travaux pour l'aménagement de l'usine de Barberine ont présenté la particularité d'avoir été entrepris, sous la pression de l'opinion publique et pour procurer des occasions de travail, alors que les études de détail étaient loin d'être terminées. En effet :

Les voies d'accès aux futurs chantiers n'étaient pas encore aménagées, ce qui a contribué à faire illusion sur les difficultés présumées d'exécution des travaux, difficultés qui ont été exagérées.

Les débits de la Barberine, notamment ceux des hautes eaux, n'étaient pas exactement connus, de sorte que le volume d'eau qu'il convenait d'emmagasiner dans le futur lac n'a pu être déterminé qu'approximativement. En fait, il a été choisi trop petit d'au moins 20 %.

Le profil et l'implantation du barrage étaient insuffisamment étudiés. Ils ont été complètement modifiés après l'adjudication des travaux et la solution finalement adoptée n'est pas très heureuse, en ce sens qu'elle ne permet pas le surhaussement du barrage.

Aucune décision n'était encore prise sur la nature des matériaux à utiliser pour la construction du barrage : maçonnerie de moellons ou béton. Si cette dernière solution était adoptée, fallait-il recourir au ballast calcaire roulé du plateau de Barberine ou à du concassé de gneiss ou de granit ?

Les travaux de l'infrastructure du funiculaire et de la route d'accès entre le sommet du funiculaire et Emosson ont été adjugés et commencés, en juillet 1919, sur la base d'un projet général très peu précis, les levers de terrain ayant été par trop sommaires étant donné le terrain très accidenté.

C'est pourquoi la première tâche de la Direction des travaux a consisté à compléter le plus rapidement possible les levers de terrain et à préparer les projets d'exécution indispensables. Bien souvent des levers effectués le matin ont dû être mis au net l'après-midi, pour permettre de donner le soir des indications sur les travaux à entreprendre le lendemain.

Etude des matériaux.

L'étude des matériaux devant servir à la construction du barrage n'était même pas commencée lors de la mise en soumission et de l'adjudication de ces travaux.

¹ Conférence faite devant les membres de l'A³E²I.L. et de la S.V.I.A., le 17 février 1945, à Lausanne.

Aussi, concurremment avec la mise au point des détails des projets généraux de construction, la Direction des travaux a dû entreprendre au plus tôt cette étude pour fournir une base solide aux décisions à prendre.

Il fallait décider en premier lieu si le barrage devait être construit en maçonnerie ou en béton ?

Dans le premier cas, il fallait fixer l'emplacement des carrières à exploiter.

Dans le second cas, il fallait choisir entre ballast roulé du plateau de Barberine et sable et gravier provenant de gneiss ou de granit concassés. Ensuite, déterminer la granulation désirable du ballast (proportion de sable au gravier) ainsi que l'influence du dosage et de la consistance du béton sur la résistance de celui-ci et sur son étanchéité. Enfin, il convenait de décider comment se ferait le contrôle de la qualité du béton au cours des travaux.

La solution consistant à construire le barrage en maçonnerie a été très vite abandonnée, à cause de l'impossibilité de trouver une carrière convenable à proximité du barrage. De plus, l'exécution en maçonnerie aurait exigé une nombreuse main-d'œuvre spécialisée, difficile à recruter, à loger et à ravitailler.

L'étude des matériaux a ainsi pu se borner à celle des sables et graviers à utiliser pour la fabrication du béton.

Si extraordinaire que cela puisse paraître maintenant, les connaissances générales sur les bétons, de même que celles sur les ciments, étaient encore rudimentaires en 1919. Les beaux travaux de Feret sur les mortiers, publiés en 1892 et 1896, étaient restés ignorés de la plupart des ingénieurs, et aucun d'eux n'aurait pu indiquer sûrement la résistance que pouvait atteindre un béton fabriqué avec un ballast déterminé et un certain dosage de ciment, sans avoir procédé au préalable à de nombreux essais comparatifs.

La mode en était encore au béton damé, sans s'inquiéter de la formation de nids de gravier. La résistance à la compression importait seule, celle à la flexion ainsi que la compacité du béton étaient considérées comme qualités secondaires. Aussi beaucoup de bétons étaient-ils poreux et perméables.

La gélivité du vieux béton était ignorée et même niée. Une préférence, d'ailleurs toute platonique, était accordée aux ballasts concassés ; si l'on utilisait surtout des ballasts roulés c'était à regret, par raison d'économie.

Ceci ne veut pas dire qu'on n'ait pas su réaliser d'excellents bétons, il est facile de prouver le contraire : canal d'aménée de l'usine de Massaboden, conduite forcée en béton armé de l'usine du Bois-Noir, viaduc de Langwies, barrage de Montsalvens, etc. Mais il n'existait pas de méthode générale pour le choix des matériaux et du dosage. Dans chacun des cas ci-dessus il a fallu procéder à de nombreux essais préliminaires pour trouver une solution valable seulement dans le cas spécial envisagé.

Les seules idées générales étaient fournies par les normes S. I. A. de 1909, ainsi que par l'Ordonnance fédérale de 1915 sur les constructions en béton armé.

Celles-ci prescrivaient l'emploi d'un sable, autant que possible à grains anguleux, de 0 à 8 mm, ne devant pas contenir plus de 10 % de particules de diamètre inférieur à 0,5 mm. Le gravier, de 8 à 30 mm, devait être ajouté au sable dans la proportion de 800 litres de gravier pour 400 litres de sable, ce qui devait donner 1000 litres de mélange et correspondre à 1³ m de béton.

Premiers essais.

A défaut de renseignements plus précis, nous avons fabriqué des bétons damés exactement conformes à ces prescriptions. Puisque le sable ne devait pas contenir plus de 10 % de grains de diamètre inférieur à 0,5 mm, nous avons pensé qu'il était préférable de supprimer ces grains qui paraissaient indésirables. Le sable a été gradué *linéairement* de 0,5 à 8 mm, le gravier de 8 à 30 mm, la proportion de sable au gravier étant de 4 à 8.

Le béton ainsi obtenu paraissait bien grossier et difficile à mettre en œuvre, néanmoins nous avons attendu avec confiance les résultats des essais à la compression effectués au L. F. E. M. de Zurich, puisque nous avions observé à la lettre les prescriptions des normes.

Une grosse déception nous attendait. Malgré la précaution prise de n'employer qu'aussi peu d'eau de gâchage que possible, malgré le damage soigné du béton très grossier, les résistances n'ont guère dépassé 50 à 60 kg/cm² à vingt-huit jours pour un dosage de ciment de 200 kg. Ces résultats, nettement insuffisants, ont été confirmés par tous les bétons fabriqués avec les divers ballasts à disposition, même si la teneur du sable en fin était portée à 10 %, maximum admissible d'après les normes.

Ces échecs étaient-ils attribuables à la nature des ballasts ? Il fallait donc comparer le ballast calcaire au ballast granitique, le roulé au concassé. Comment effectuer cette comparaison ?

Les éprouvettes pour les essais normaux des ciments étaient, et sont encore, fabriquées avec du sable normal de 0,5 à 1,0 mm qui paraissait donc être un sable idéal. C'est pourquoi, pour comparer les ballasts entre eux, nous avons extrait de ceux-ci des sables de 0,5 à 1,0 mm, ayant donc la même granulation que le sable normal.

Nous avons eu de nouvelles surprises. Les cubes de mortier 1 : 3 damés, fabriqués avec les sables de 0,5 à 1,0 mm extraits de n'importe quel ballast, ont tous donné sensiblement les mêmes résistances que ceux fabriqués avec le sable normal officiel. Le choix devenait difficile.

D'autre part, des mortiers 1 : 3 damés fabriqués avec un sable roulé de 0 - 8 mm, correspondant à la granulation moyenne du plateau de Barberine, ont donné des résistances égales ou supérieures à celles du mortier normal officiel. Le sable normal n'est donc pas le meilleur qu'on peut imaginer.

Enfin, des bétons fabriqués avec le calcaire roulé, un peu schisteux, du plateau de Barberine ont fourni des résistances égales ou mêmes supérieures à celles des bétons fabriqués avec du concassé granitique. La supériorité du concassé sur le roulé, comme celle du granit sur le calcaire, est donc aussi contestable.

Les résultats de cette première campagne d'essais ont donc été presque entièrement négatifs. Ils ont cependant mis en évidence les points suivants :

Les indications des normes de 1909 concernant le sable et le gravier et les proportions de leur mélange ne sont pas valables dans tous les cas. Elles ne sont utiles, comme certaines autres normes, qu'à condition de n'être pas observées à la lettre.

Les essais ultérieurs ont montré que la proportion du sable au gravier doit être de 5 à 7 ou même de 6 à 6, plutôt que celle prescrite de 4 à 8. De même, la teneur du sable en particules plus fines que 0,5 mm doit en général dépasser notablement 10 % ; elle dépend d'ailleurs du dosage en ciment.

Nouveaux essais.

Il fallait donc reprendre les essais méthodiquement sur de nouvelles bases. C'est alors que l'étude des remarquables travaux de Feret, de Taylor et Thompson, de Fuller, de Young, de Williams, de Billings, ainsi qu'un voyage aux barrages espagnols de Tremp et de Camarasa, achevés depuis peu, vint donner une impulsion nouvelle aux essais en les aiguillant sur la bonne voie. C'est à Tremp et à Camarasa que nous avons eu l'occasion de voir pour la première fois un béton coulé, parfaitement compact, étanche et résistant. La composition granulométrique de Camarasa, qui nous fut obligeamment communiquée par M. Billings, directeur des travaux de Camarasa, nous servit longtemps de base pour nos recherches personnelles.

Mais les résultats américains n'étaient pas applicables sans autre, il fallait les adapter à nos conditions particulières. Dans ce but, nous avons entrepris une série d'essais systématiques destinés à mettre en évidence d'une façon précise l'influence de la teneur du sable en particules fines sur la résistance et l'étanchéité de mortiers à divers dosages, mous ou damés.

Pour des mortiers gradués de 0 - 10 mm, nous avons trouvé que la résistance est maximum si la teneur du mélange (C + S) en fin 0 - 0,5 mm atteint le 30 % du poids des matières sèches. Elle doit être plus grande pour du concassé que pour du roulé.

Parallèlement aux essais ci-dessus, d'autres recherches ont été effectuées pour déterminer la composition granulométrique à densité maximum, c'est-à-dire offrant le minimum de vides à remplir par le lait de ciment. Des essais, effectués en faisant varier systématiquement les proportions du mélange de deux grosseurs de grains de ballast ont montré que la compacité est maximum si le diamètre du petit grain est le dixième de celui du gros grain et si le mélange se fait dans la proportion

en poids de 63 % de gros grains et 37 % de petits grains.

Un sable à densité maximum sera constitué par le mélange en proportions convenables de plusieurs de ces compositions élémentaires.

Après bien des tâtonnements et de très longues recherches, nous avons établi nos trois formules fondamentales¹ :

$$(1) \quad P = A + (100 - A) \sqrt{d : D}$$

qui correspond toujours à une excellente *granulation du mélange (ciment + ballast)* et qui est applicable à tous les mortiers et bétons, quels que soient le dosage en ciment, la nature du ballast et la consistance du béton.

$$(2) \quad R = (C/E - 0,50) \times K$$

qui montre que la *résistance R* à la compression dépend essentiellement du rapport ciment : eau et du coefficient *K* de qualité du ciment et non de la nature du ballast ; et enfin

$$(3) \quad E = \Sigma e = \Sigma \frac{p \cdot n}{\sqrt[3]{d_1 \cdot d_2}}$$

qui permet de *calculer l'eau de gâchage*, connaissant la granulation et la nature du ballast (roulé ou concassé), ainsi que la consistance du béton.

Le groupe des formules (1), (2), (3) permet de calculer à l'avance toutes les caractéristiques d'un béton : granulation désirable, eau de gâchage correspondante, résistance probable et densité du béton complet.

La formule (1) donne la granulation théorique d'un béton. Le module de finesse d'Abrams permet de déterminer dans quelle mesure il est permis de s'écarter sans inconvénient de cette granulation théorique ; il permet également de calculer la quantité d'eau de gâchage et rend ainsi les mêmes services que la formule (3)².

Proportions du mélange sable/gravier.

Dans le cas du barrage de Barberine, ces proportions étaient déjà fixées dans la soumission ; il n'était pas question de les modifier et elles ont été observées bien qu'elles eussent pu être améliorées.

Il convenait cependant de rechercher les proportions les plus favorables du mélange sable/gravier pour d'autres chantiers ; c'est au cours de ces essais que nous avons établi la formule (1) ci-dessus, qui montre que ces proportions sont variables suivant les granulations du sable et du gravier et suivant le dosage en ciment.

Par un heureux hasard, la granulation moyenne du béton de Barberine ne s'écarte pas trop de la courbe théorique, sauf en ce qui concerne la teneur du sable en grains fins qui a été généralement trop faible et a

¹ Voir : « Détermination de la résistance à la compression des mortiers et bétons », par J. BOLOMEY. *Bulletin technique* nos 11, 13, 14 et 17, 1925. — « Granulation et prévision de la résistance probable des bétons », par J. BOLOMEY. *Bulletin technique* nos 7 et 8, 1936. — « Choix des caractéristiques des bétons sur les chantiers », par J. BOLOMEY. *Bulletin technique* n° 2, 1944.

² Voir : « Module de finesse d'Abrams et calcul de l'eau de gâchage des bétons », par J. BOLOMEY. Publication du jubilé du cinquantenaire de L. F. E. M.

nécessité un excès d'eau de gâchage. Par contre, si la granulation moyenne a été satisfaisante, il y a eu de gros écarts d'un jour à l'autre.

Nous avons fait en outre les constatations suivantes, en partie inattendues et contraires aux idées généralement admises :

- 1° Le ballast humide a une plus faible densité que le même ballast sec. La différence peut atteindre 10 à 20 %.
- 2° La proportion du sable au gravier doit être plus élevée pour le concassé que pour le roulé, ce qui correspond à une plus grande quantité d'eau de gâchage, donc à une moindre résistance du béton de concassé par rapport à celle obtenue par le béton de roulé.

Dosages.

Les dosages fixés par la soumission pour le béton s'entendaient par mètre cube de gravier, le volume du sable devant correspondre au volume des vides du gravier majoré de 100 litres.

Dans le cas du barrage de Barberine, ces proportions n'ont pas correspondu à 1000 litres de béton, mais à 1200 litres. Les dosages nominaux ont dû être majorés de 20 % environ pour réaliser les dosages effectifs par mètre cube de béton prévus et nécessaires.

Ce mode de dosage défectueux a coûté plusieurs centaines de milliers de francs aux C. F. F. pour payer deux fois une partie du ciment.

C'est pour cette raison que pour la deuxième étape de la construction du barrage de Barberine et pour tous les travaux de l'usine de Vernayaz, les dosages ont été fixés par mètre cube de béton en place, le sable et le gravier devant être livrés séparément et mélangés dans des proportions permettant d'obtenir un béton compact.

Ces nouvelles prescriptions ont été appliquées sans difficulté et sans donner lieu à des contestations.

Ce mode de dosage par mètre cube de béton, prescrit pour la première fois en Suisse sur les chantiers de Barberine et Vernayaz, est généralement adopté partout maintenant, bien que son application laisse encore à désirer. Les nouvelles normes S. I. A. sur la fabrication du béton marquent à ce point de vue un recul sur les normes pour le béton armé de 1935.

Essais de ciment.

La qualité du ciment a été régulièrement contrôlée par des essais normaux complets effectués tous les quinze jours à Zurich ou à Lausanne et par des essais journaliers, de résistance à la compression seulement, effectués au laboratoire de la Direction des travaux.

Les essais sur mortier normal damé mécaniquement, tels qu'usités jusqu'en 1933, sont caractérisés par un dosage excessif d'environ 550 kg de ciment par mètre cube de mortier, par un damage intense dépassant de beaucoup tout ce qui peut être réalisé sur le chantier, par une consistance très sèche nécessitant ce damage

intense et surtout par l'emploi d'un sable de 0,5 à 1,0 mm, ayant une granulation aussi mauvaise que possible. Tout est donc anormal dans ces essais normaux.

Le sable ayant beaucoup de vides, il faut un fort dosage pour améliorer la compacité ; en outre, une partie seulement du ciment est utile à la résistance, une autre partie ne sert qu'à remplir les vides du sable et peut être remplacée sans grand inconvénient par de la poudre de pierre. Ainsi un ciment amaigri, contenant 10 à 20 % de poudre de pierre, peut donner aux essais normaux une résistance presque aussi élevée qu'un ciment pur. De là les longues discussions sur les avantages présumés du ciment amaigri et la pratique de beaucoup de fabriques d'allonger leur ciment par l'addition de poudre de pierre, en prétextant que ce mode de faire n'avait aucun inconvénient et même qu'il améliorerait la qualité du ciment tout en permettant de réduire son prix de vente.

En réalité, si cet amaigrissement est peu sensible sur les résistances des mortiers normaux, elle a une influence très fâcheuse sur les résistances des bétons¹.

Cet amaigrissement du ciment n'a été formellement interdit que par les normes de 1933 qui imposent l'analyse chimique sommaire pour vérifier la pureté du ciment.

Une tentative de reprendre cette question au début de cette guerre par la fabrication d'un *ciment B* a échoué devant l'opposition unanime de tous les consommateurs de ciment.

Les essais actuels au mortier normal damé à la main, bien que préférables aux anciens, laissent encore à désirer, le sable normal n'ayant pas été modifié.

Pour mieux définir la qualité du ciment, nous avons cherché à l'exprimer par la résistance qui sera obtenue par un béton à dosage, granulation et consistance connus. Cela nous a conduit, après étude des travaux de Feret, Abrams, Graf, etc., à donner notre formule (2) de prévision de la résistance probable d'un béton en fonction du rapport C/E et du coefficient K de qualité du ciment².

Ici encore une surprise : la résistance dépend essentiellement du rapport C/E et non de la nature ou de la granulation du ballast, ce dernier ne jouant que le rôle de matière de remplissage permettant, si la granulation est bonne, de diminuer le volume de la pâte liante. Cette constatation renversait bien des idées préconçues, notamment celle de la supériorité du concassé sur le roulé.

Stabilité de volume.

Un ciment doit être stable. C'est là une caractéristique essentielle qui importe plus que n'importe quelle autre. Les ciments utilisés à Barberine ont tous satisfait à cette condition, mais nous avons eu cependant une chaude alerte.

¹ Voir : « Influence de l'addition de poudre de pierre au ciment sur les qualités du béton », par J. BOLOMEY. Travaux, août 1936.

² Voir : « Contrôle des qualités des ciments », par J. BOLOMEY. Recueil de travaux publiés par l'École d'ingénieurs à l'occasion du quatrième centenaire de l'Université.

Recevant un jour un procès-verbal du Laboratoire de Zurich, je remarque que sous la rubrique « Stabilité de volume » il est indiqué « Essai pas subi ». Je ne m'en inquiète pas autrement : pour une raison quelconque, cet essai n'a pas été effectué. Le fait s'étant répété plusieurs fois de suite, j'écris au Laboratoire pour demander pourquoi cet essai n'a pas été effectué. Je reçois la réponse : « L'essai a bien été fait, mais n'a pas été subi, c'est-à-dire supporté ». Cela devenait une affaire excessivement grave. Arrêt des fournitures de ce ciment et enquête. Heureusement, celle-ci a calmé nos appréhensions : le ciment incriminé n'était instable qu'aux essais accélérés à l'eau chaude et non aux essais déterminants à vingt-huit jours à l'eau froide. L'instabilité n'était que passagère et provenait de la livraison d'un ciment trop jeune et encore chaud. Après quelques jours de silosage, l'instabilité apparente disparaissait.

Pour éviter toute équivoque, nous indiquons sur les procès-verbaux du Laboratoire de Lausanne : « Essai supporté » ou « Essai non supporté ».

Perméabilité du béton.

Le béton d'un barrage doit être pratiquement étanche. La réalisation d'un tel béton a été étudiée avec un soin particulier pour le barrage de Barberine. Il s'agissait de déterminer l'influence de la granulation du ballast, du dosage en ciment, de la consistance du béton sur la perméabilité de celui-ci.

Des essais ont été effectués dans ce but par la Commission pour l'étude de l'étanchéité de l'Association suisse pour l'aménagement des eaux. Ils ont été longs, ont coûté plus de 3000 fr. et n'ont donné aucun résultat pratique.

Le problème a été repris par la Direction des travaux de Barberine en utilisant un procédé dérivé de celui utilisé par M. le professeur Paris pour l'étude de l'étanchéité de la conduite forcée en béton armé de l'usine du Bois-Noir. Ce procédé, qui a été également utilisé, sur nos indications, pour le barrage de Wäggital, consiste à placer un sachet de gravillon à l'intérieur d'un cube de béton de 20 cm de côté. Une tubulure, scellée dans le béton, aboutit à ce sachet et permet d'introduire de l'eau à une certaine pression au centre du cube. Les pertes d'eau peuvent être mesurées avec une grande précision.

L'avantage de ce procédé est d'être peu encombrant, très économique et de permettre de poursuivre simultanément un grand nombre d'essais.

Un autre procédé, plus précis et également très économique a été mis au point plus tard ; il est encore utilisé au Laboratoire de Lausanne.

Ces essais de la Direction des travaux de Barberine ont permis de résoudre le problème de la perméabilité du béton : celle-ci est due aux fissurations microscopiques provoquées par le retrait.

N'importe quel béton à la consistance pâteuse, mis en œuvre correctement et sans nids de gravier, est

pratiquement étanche s'il a durci dans un milieu humide, de façon à éviter les tensions de retrait. Inversement, n'importe quel béton exposé à l'air sec, avant d'avoir convenablement durci, sera plus ou moins perméable. La perméabilité est étroitement liée à la fissuration microscopique du béton.

Gélivité du béton.

Ce problème a été longuement étudié au cours de la construction du barrage de Barberine ; de nombreux essais ont été effectués. Chacun sait que les résultats pratiques de ces recherches n'ont pas correspondu aux prévisions et que le béton du barrage de Barberine, comme celui du barrage de Wäggital, est très gélif, ce qui a nécessité des travaux de réfection importants et coûteux.

Tandis que la gélivité du béton frais n'ayant pas terminé son durcissement est connue depuis longtemps, celle du vieux béton ayant longuement durci, comme celle des briques ou des tuiles, n'a été complètement éclaircie que depuis quelques années, précisément par les expériences faites au barrage de Barberine.

En 1925 encore, dans son ouvrage *Einflüsse auf Beton*, le professeur O. Graf écrivait :

« Il est connu que le gel n'a pratiquement aucune influence sur le béton ayant convenablement durci. »

La Commission S. I. A. du béton coulé, dont le rapport a été publié en été 1925, est arrivée, au fond, aux mêmes conclusions.

Au congrès des Grands barrages de Stockholm en 1930, les ingénieurs suédois et norvégiens attribuaient à l'action des eaux très pures des dommages qui devaient être attribués à la gélivité du vieux béton.

Ces appréciations optimistes ne devaient pas tarder à être démenties par les faits et maintenant on constate partout des altérations dues au gel, même en plaine. Ce qui a fait illusion, c'est l'emploi d'une méthode d'essai au gel défectueuse :

Les échantillons soumis aux essais de gélivité étaient exposés, saturés d'eau, à une série de vingt-cinq gels et dégels. On déterminait ensuite la chute de la résistance à la compression ainsi que le poids du mortier complètement désagrégé, en le rapportant en gr/dcm² de la surface de l'échantillon. Cet essai est admissible pour des roches poreuses, telles que la mollasse, mais non pour le béton. L'expérience montre que celui-ci peut être endommagé par le gel, au point de pouvoir être rompu entre les doigts, sans qu'il y ait chute de mortier désagrégé et sans que la résistance à la compression subisse une réduction notable.

On croyait que l'action du gel se fait sentir progressivement du parement au centre de l'échantillon, comme c'est le cas pour de la mollasse, alors qu'elle agit simultanément dans toute la masse du béton gelé par déchaussement des gros graviers qui sont expulsés par le gel hors de leurs alvéoles de mortier.

Nous avons raisonné comme suit : Après vingt-cinq

sollicitations au gel, les déchets provoqués par celui-ci n'ont que très rarement atteint 25 gr/dcm², souvent ils ont été inférieurs à 1 gr. Or 25 gr/dcm² correspondent à une pellicule de béton de 1 mm d'épaisseur. En mettant les choses au pire, le béton sera détérioré sur une épaisseur de 2 à 3 cm après une trentaine d'années. A ce moment, il suffira de munir le parement amont d'un enduit gunité pour le restaurer complètement. Quant à la chute de résistance à la compression, de 10 à 20 %, elle sera largement compensée par le durcissement normal du béton.

Les plus beaux raisonnements ne tiennent pas devant la réalité. Le gel peut attaquer le béton dans toute la masse gelée, c'est-à-dire sur une épaisseur dépassant 0,80 à 1,00 m. Il provoque le déchaussement des graviers, une fissuration, souvent imperceptible, de la pâte liante, ce qui a pour conséquence de diminuer très sensiblement, non pas la résistance à la compression qui est peu modifiée, mais la résistance à la traction et le module d'élasticité apparent.

Depuis 1931, nous avons modifié en conséquence l'essai de gélivité ; ce que nous déterminons maintenant c'est la chute de la résistance à la flexion et du module d'élasticité du béton sous l'action du gel. Cette méthode, mise au point par le Laboratoire de Lausanne, a été aussi adoptée depuis par le Laboratoire fédéral de Zurich.

Les recherches entreprises sur ces nouvelles bases ont abouti aux conclusions suivantes :

Contrairement à ce que l'on croit généralement, la gélivité d'un béton ne dépend ni de sa porosité, ni de sa résistance, mais essentiellement de sa fissuration, souvent microscopique, due au retrait et aux variations locales de température, ainsi qu'aux vides laissés sous les gros graviers par la remontée de l'excès d'eau de gâchage. A égalité de résistance un mortier sera moins gélif qu'un béton contenant des gros graviers. Toute fissure est une amorce d'attaque par le gel¹.

Pour réaliser un béton non gélif, il faut le gâcher avec peu d'eau pour réduire le retrait et les effets de la remontée d'eau de gâchage. Pour atténuer les inconvénients de cette dernière, il ne faut pas utiliser, pour les bétons exposés au gel, un gravier dont les grains dépassent 30 mm de diamètre.

Par analogie, les briques et les tuiles, bien que toujours très poreuses et à résistance modérée, ne sont gélives que si elles ont une texture feuilletée due à un défaut dans le rebattage de l'argile.

* * *

Il y a encore une autre forme très importante de la gélivité du béton que nous avons constatée, en 1938, lors des essais d'un bloc de béton au dosage de 300 kg

¹ Voir : « Etude des parements des barrages en béton et en maçonnerie », par J. BOLOMEY. Publication du « Second congress on large dams », Washington, 1936. — « Module d'élasticité du béton », par J. BOLOMEY. *Bulletin technique* n° 17 et 18, 1939. — « Destruction des bétons par voie chimique, physique ou mécanique », par J. BOLOMEY. *Bulletin technique* n° 21, 1940.

prélevé dans le parement du barrage de Barberine.

Le béton altéré tend à se détacher en feuillets verticaux parallèles au parement ; les graviers ne sont pas déchaussés comme cela paraîtrait normal, mais certains ont été cisailés par des *efforts tangentiels parallèles au parement*. Tandis que la résistance à la flexion reste notable pour les prismes horizontaux ou verticaux parallèles au parement, elle est tombée à zéro pour les prismes normaux à celui-ci.

Cette fissuration spéciale dans des plans parallèles au parement, alors que la pâte liante n'est pas détruite, est due au gonflement du béton gelé par rapport au même béton non gelé. Il se produit des efforts tangentiels intenses au point de contact du béton gelé avec celui qui ne l'est pas encore, efforts qui peuvent provoquer le cisaillement du béton. A mesure que le gel pénètre dans la masse du béton, il se forme une série de fissures parallèles au parement. Ces fissures s'élargissent progressivement sous l'action du gel et du dégel jusqu'à ce que se produise la chute de feuillets de béton.

Ce phénomène de dilatation du béton gelé est très étroitement apparenté au soulèvement des chaussées. Dans certains cas, suivant la nature du sous-sol et du revêtement, celui-ci peut se dilater sous l'action du gel. Il se produit des compressions tangentielles dans le plan du revêtement qui peuvent provoquer son soulèvement par flambage. C'est pour cette raison que le soulèvement est généralement plus marqué au milieu de la chaussée que sur ses bords.

La dilatation du béton gelé peut atteindre 0,1 à 0,2 mm/m³ pour du béton coulé, comme celui du barrage de Barberine ; elle est pratiquement nulle pour du béton vibré.

Lausanne, février 1945.

Poutres formant radier sur sol compressible

par A. PARIS, professeur à l'Ecole d'ingénieurs
de l'Université de Lausanne.

Les phénomènes de déformation des sols de fondation, sollicités par la charge des bâtiments ou autres ouvrages, sont affectés de deux facteurs qui influencent défavorablement la fidélité des efforts à la loi de Navier. D'une part l'homogénéité, généralement locale, empêche l'élasticité supposée de se manifester par une loi simple, qu'on admet quand même par nécessité de calcul. D'autre part, cette élasticité, jointe à l'impossibilité de réactions négatives sous les ondes de soulèvement, fait que la déformation se manifeste par des cuvettes localisées, que le calcul suppose finir brusquement à leur point d'émergence, tandis qu'un raccordement s'impose en réalité avec les surfaces primitives du sol, demeurées telles dans les régions non affectées.