Zeitschrift: Bulletin technique de la Suisse romande
Band: 65 (1939)
Heft: 18

Artikel: Module d'élasticité du béton
Autor: Bolomey, J.
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-50012

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Siehe Rechtliche Hinweise.

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. Voir Informations légales.

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. See Legal notice.

Download PDF: 05.05.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Module d'élasticité du béton,[1]

par J. BOLOMEY, professeur à l'Ecole d'ingénieurs
de l'Université de Lausanne.

(Suite et fin) [2]

Hétérogénéité du béton.

Le béton est un corps hétérogène, non pas seulement parce qu'il est composé de pâte liante et de ballast, mais encore parce que celui-ci est plus ou moins irrégulièrement réparti dans la masse du béton (démélange partiel) et parce que la pâte liante elle-même n'a pas partout le même rapport C/E. Cette hétérogénéité sera d'autant plus prononcée que le béton aura été gâché à une consistance plus fluide et que la granulation (compacité) laisse davantage à désirer.

Du fait du démélange partiel, la compacité varie d'un point à l'autre de la masse du béton ; il en sera par conséquent de même pour le module d'élasticité qui est fonction de cette compacité.

La pâte liante n'a pas partout le même rapport C/E et la même résistance. Entre l'instant de la mise en place du béton et celui de la prise du ciment, il se produit presque toujours une séparation et une remontée de l'excès d'eau de gâchage. Cette dernière est lente, la prise du ciment intervient ordinairement avant qu'elle soit terminée, de sorte que le rapport C/E est un peu plus élevé au bas qu'au haut d'une même couche de béton.

D'autre part les gouttelettes d'eau sont retardées dans leur mouvement ascensionnel par les grains de gravier. Elle s'accumulent sur la face inférieure de ceux-ci, y forment une pellicule d'eau ou de laitance à faible C/E qui persiste jusqu'à la prise du ciment. Ce sont ces vides lenticulaires sous chaque grain de gravier qui rendent le béton gélif, qui diminuent sa résistance par rapport à celle du mortier extrait de même C/E, qui expliquent que la résistance à la traction dans un plan horizontal est toujours notablement plus faible que dans un plan vertical et qui sont la cause de ces curieuses ruptures, si caractéristiques qu'elles permettent l'orientation d'un échantillon de béton : dans une cassure suivant un plan horizontal tous les graviers restent attachés à la face supérieure, la face inférieure ne conservant que les alvéoles.

Par suite de l'arrêt de la remontée d'eau par les grains de gravier, le module d'élasticité sera plus faible dans le sens vertical que dans le sens horizontal parce que les déformations tant élastiques que permanentes seront plus grandes verticalement qu'horizontalement.

Ces particularités ont été mises en évidence en fabriquant une colonne de $20 \times 20 \times 150$ cm en béton ayant les caractéristiques : Dosage ciment 260 kg/m³, ballast gradué 0—120 mm, eau 156 l/m³, consistance molle, densité 2,45, âge aux essais environ 2 mois. Des prismes verticaux et horizontaux ont été découpés à la scie au pied et au sommet de la colonne, leurs modules, pour un taux de travail compris entre 10 et 60 kg/cm², ont été :

	Prismes horizontaux :		*Prismes verticaux :*	
	E_{el}	E_{tot}	E_{el}	E_{tot}
Au bas colonne	318 t/cm²	288 t/cm²	286 t/cm²	268 t/cm²
Au haut colonne	301 t/cm²	280 t/cm²	215 t/cm²	195 t/cm²

Tous les modules sont plus faibles au haut de la colonne qu'au bas de celle-ci.

Tous les modules des prismes verticaux sont plus faibles que les modules des prismes correspondants horizontaux. Les différences sont particulièrement marquées au haut de la colonne où l'élimination de l'excès d'eau de gâchage a été beaucoup moins complète qu'au bas de celle-ci.

Ainsi, pour une même masse de béton de 1,5 m de hauteur, les modules ont varié de 215 à 318 t/cm², soit de 47 %, suivant que les prismes ont été prélevés au bas ou au haut de la colonne, dans le sens horizontal ou vertical. Les résistances à la flexion ont varié de 30 à 24 kg/cm² entre le bas et le haut du grand prisme vertical constitué par la colonne (ruptures horizontales). Les résistances à la compression ont varié parallèlement de 230 au bas à 205 kg/cm² au haut de la colonne.

Pour éviter de telles divergences lors d'essais de laboratoire, il convient de déterminer les modules sur prismes fabriqués en position horizontale et ayant durci dans l'eau, en se rappelant que les modules dans le sens vertical seront fréquemment plus faibles de 10 à 20 %.

Influence du retrait.

Il est connu que, *à égalité de rapport* C/E, le retrait apparent du béton est plus faible que celui du mortier ; celui-ci à son tour est plus faible que celui de la pâte de ciment. Cette anomalie n'est qu'apparente. Sous l'action du retrait, auquel s'opposent les grains de gravier, il se

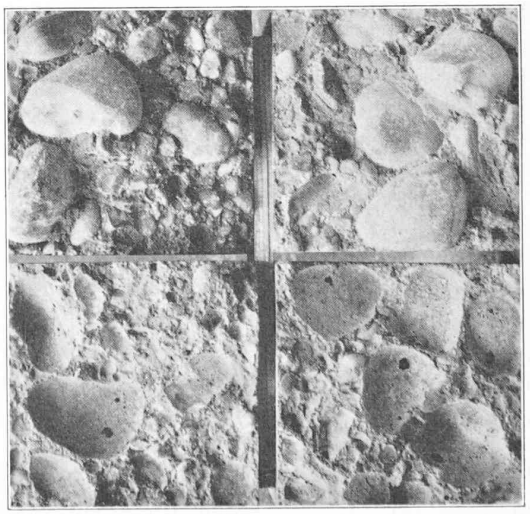

Fig. 5. — Cassures par flexion suivant un plan horizontal de deux prismes fabriqués en position verticale.
En haut : graviers adhérents.
En bas : alvéoles, pas de graviers adhérents.

[1] Conférence faite devant le *Groupe des Ponts et Charpentes* de la Société suisse des ingénieurs et des architectes, à Lausanne.

[2] Voir *Bulletin technique* du 12 août 1939, page 215.

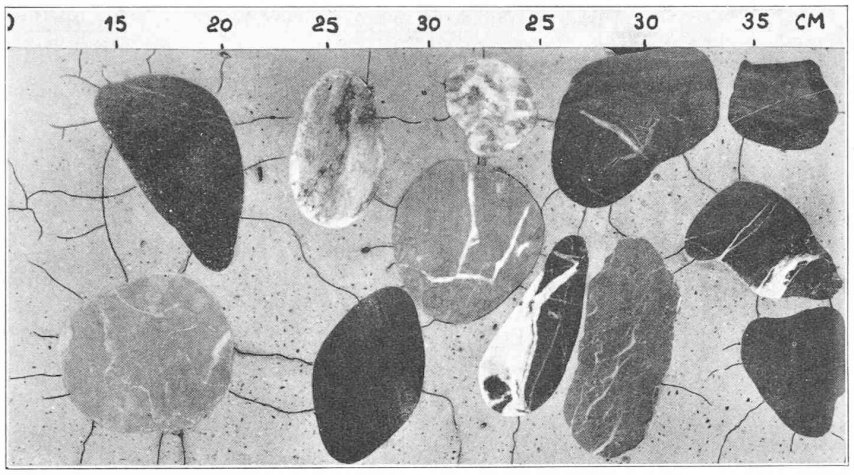

Fig. 6. — Coupe d'un prisme de béton sur laquelle on a fait ressortir la fissuration interne provoquée par les gros graviers lorsque le séchage du béton est trop rapide.

produit des tensions intérieures : les graviers sont comprimés, le mortier tendu. Si le retrait s'accentue suffisamment lentement, la pâte liante subit progressivement un allongement plastique qui peut compenser les raccourcissements dus au retrait ; dans ce cas il n'y aura pas de fissuration. Si par contre le séchage est rapide, les tensions intérieures pourront devenir suffisamment grandes pour provoquer une fissuration interne plus ou moins prononcée qui rendra le béton perméable et parfois gélif (voir fig. 6).

Cette fissuration interne n'a pas grande influence sur la résistance à la compression, mais bien sur celle à la flexion ainsi que sur le module d'élasticité qui seront en général plus faibles pour les bétons ayant séché rapidement que pour ceux conservés humides. D'autre part, lors de la détermination du module d'élasticité d'un béton ayant durci à l'air, on constate souvent des déformations permanentes relativement importantes et des irrégularités des valeurs du module sous faible charge, irrégularités qui doivent être attribuées à la fermeture progressive de ces fissures internes.

L'état de santé d'un béton peut ainsi être contrôlé par l'allure des déformations, spécialement de celles permanentes sous faibles charges, ainsi que par la valeur du rapport de la résistance à la flexion à celle à la compression.

Influence de la durée du durcissement.

A égalité de résistance et de compacité (densité), les très jeunes bétons ont un module plus faible que ceux plus âgés. Cette particularité peut être attribuée au processus du durcissement du ciment, les gels colloïdaux relativement malléables se transformant progressivement en masses cristallines plus cassantes et à modules plus élevés. Cette hypothèse doit encore être vérifiée. Les déformations plastiques paraissent également être fonction de la durée du durcissement.

Nos formules ont été établies pour des bétons âgés d'au moins 7 jours, prismes fabriqués en position horizontale et ayant durci dans l'eau, soumis à une fatigue ne dépassant pas le 20 % de la résistance de rupture. Dans les autres cas les valeurs du module calculé peuvent dépasser celles des modules effectifs de 5 à 10 %.

Influence du taux de travail.

Les déformations ne sont pas rigoureusement proportionnelles aux charges, mais croissent plus rapidement que celles-ci. En outre les déformations élastiques sont souvent accompagnées de déformations permanentes dont l'importance croît avec la fatigue du béton et sont un indice de celle-ci. Le module d'élasticité est donc variable en fonction du taux de travail auquel il est soumis et suivant qu'on considère les déformations élastiques seules (E_{el}) ou la somme des déformations élastique et permanente (E_{tot}). Le tableau IV indique ces variations pour le béton de la figure 1. Pour les taux de travail usuels, les variations du module d'élasticité sont généralement inférieures à 10 %.

Les déformations ne sont pas les mêmes lorsque la charge augmente que lorsqu'elle diminue ; il y a toujours un certain retard dans les déformations (hystérésis) qui est parfois très prononcé. Ce phénomène s'apparente très étroitement à l'accentuation des déformations lorsque les charges sont maintenues un certain temps (voir tableau IV et figure 1), c'est-à-dire aux déformations lentes ou plastiques.

TABLEAU IV

Déformations d'un béton en fonction du taux de travail.

Dosage 300 kg/m³, graduation $P = 10+90\sqrt{d:30}$,
Age 4 mois, $R = 450$ kg/cm².

Taux de travail $\sigma =$	Variation de σ $d\sigma =$	Déformations ϵ $\epsilon =$	Variations de ϵ $d\epsilon =$	$E = d\sigma : d\epsilon$		Observations
				$E_{élast.}$	E_{tot}	
kg/cm²	kg/cm²	mm/m¹	mm/m¹	t/cm²	t/cm²	
0		0,00				
	+ 50		0,12	417	417	
50		0,12				
	+ 50		0,13		385	
100		0,25				
	+ 50		0,14		358	
150		0,39				
	+ 50		0,16		312	
200		0,55				
	+ 50		0,18		278	
250		0,73				
	— 250		0,69	363	342	
0		0,04				
	+ 300		0,86	350	333	
300		0,90				
	0		0,10	—	300	après 10 minutes
300		1,00				
	— 300		0,89	338	300	
0		0,11				
	+ 400		1,33	300	278	
400		1,44				
	— 400		1,24	320	278	
0		0,20				

Déformations plastiques des bétons.

Sous l'action des charges, les bétons subissent des déformations élastiques et permanentes ; les premières disparaissent, les secondes subsistent après la suppression des charges.

Les déformations permanentes, dues à un certain tassement du béton, à la fermeture des fissures intérieures provoquées par le retrait, se manifestent immédiatement pour une charge donnée et sont en général peu importantes. Au contraire celles qu'il faut attribuer à un écoulement plastique du béton s'accentuent lentement avec la durée d'application de la charge et peuvent atteindre une valeur de plusieurs mm/m[1]. Ces déformations lentes ou plastiques dépassent souvent et de beaucoup celles purement élastiques ; elles sont partiellement réversibles, notamment sous l'action de l'humidité.

Ces déformations lentes ont une extrême importancepour les bétons à armatures préalablement tendues, parce que cette précontrainte tend à disparaître avec la durée du durcissement et qu'ainsi la résistance et par suite la sécurité des pièces précontraintes diminue avec l'âge. Dans les colonnes armées la répartition des charges entre béton et métal varie constamment, celui-ci étant de plus en plus chargé, jusqu'à ce que la limite d'élasticité du métal soit atteinte.

Malgré les nombreux essais effectués ces dernières années, malgré toutes les publications qui ont traité des déformations plastiques, il s'agit là d'un phénomène encore mal connu. L'ingénieur a à sa disposition un grand nombre de résultats particuliers, qui paraissent parfois contradictoires, mais personne actuellement ne peut encore, bien que connaissant toutes les caractéristiques d'un béton, indiquer avec quelque précision quelles seront ses déformations lentes sous une charge donnée, appliquée à un âge déterminé. Quelques essais préliminaires laissent supposer que ces déformations lentes dépendent aussi bien de la compacité et de l'âge du béton que de sa résistance et du taux de travail.

Vérification de l'état de santé d'un béton.

Le module d'élasticité du béton est utile à connaître non seulement pour le calcul des déformations et des tensions dues aux hyperstatiques, aux variations de température et au retrait, mais aussi pour contrôler l'homogénéité et l'état de santé d'un béton.

Nous avons vu que si le rapport module : résistance varie d'un point à l'autre d'une même masse de béton, c'est signe d'un démélange partiel.

D'autre part une fissuration interne du béton, qu'elle soit due au retrait ou au gel, se remarque immédiatement par une chute du module et surtout par des déformations permanentes anormales.

Cette particularité est utilisée par notre laboratoire, conjointement avec la détermination du rapport de la résistance à la flexion à celle à la compression, pour déterminer la gélivité du béton. Le tableau V donne les résultats d'un essai de gélivité et montre les chutes considérables de la résistance à la flexion et du module d'élasticité au fur et à mesure de l'altération du béton par le gel. A remarquer également les différences croissantes entre E_{el} et E_{tot}.

TABLEAU V

Variation du module E et des résistances d'un béton gélif en fonction du nombre de sollicitations au gel.

	Résistances		Module d'élasticité	
	Flexion kg/cm²	Comprs. kg/cm²	Elastique t/cm²	Total t/cm²
Avant essai au gel	80	400	273	273
Après 18 sollicitations	—	—	222	150
Après 25 sollicitations	48	310	144	80
Après 45 sollicitations	6	150	47	20

Conclusions. Valeurs de E à admettre pour les calculs de béton armé.

Dans cette étude nous avons donné une formule plus précise que toutes celles actuellement connues, permettant de calculer à l'avance le module d'élasticité initial d'un béton en fonction de sa résistance à la compression et de sa compacité.

Nous avons rappelé les modifications que subit ce module initial du fait de l'hétérogénéité du béton, du mode de durcissement (retrait), du taux de travail et signalé la grande influence de la durée d'application des charges.

Les déformations du béton ne sont pas purement élastiques ; elles sont presque toujours accompagnées de déformations permanentes et plastiques qui peuvent être plus grandes, et de beaucoup, que celles purement élastiques.

Ceci étant, quelles valeurs de E convient-il d'utiliser dans les calculs ?

Le module d'élasticité déterminé sur des prismes de béton, comme celui déduit des déformations élastiques observées sur les ouvrages en béton et en béton armé, varie généralement entre 300 et 400 t/cm². Dans les calculs on admet généralement une valeur de E comprise entre 150 et 200 t/cm², et ceci avec plein succès. Si, par contre, on adoptait pour les calculs un module égal ou supérieur à 300 t/cm², les efforts calculés dus au retrait et aux variations de température seraient tels qu'il devrait s'ensuivre forcément une fissuration générale du béton, fissuration qui ne s'observe pas sur les ouvrages établis dans de bonnes conditions.

Ces anomalies apparentes sont dues aux déformations permanentes et plastiques, dont les calculs ne tiennent pas compte, qui ont pour effet de réduire très fortement le module d'élasticité total dès qu'il s'agit de charges variant lentement en fonction du temps.

Le module admis généralement dans les calculs $E = 150—200$ t/cm² est une valeur moyenne qui donne toute satisfaction pour les constructions courantes. Par contre, pour des ouvrages spéciaux, il est légitime d'admettre des modules d'élasticité différents, suivant qu'il

s'agit de calculer les tensions et déformations dues à des charges accidentelles ou à des charges permanentes. On pourra adopter par exemple :

$E = 350$ t/cm² pour les charges roulantes,
$E = 200$ t/cm² pour les variations de température et de retrait journalières ou hebdomadaires,
$E = 100$ t/cm² pour les charges permanentes et les variations saisonnières de température et de retrait.

Les essais sur lesquels est basée cette étude ont été exécutés avec beaucoup de savoir-faire et un grand souci d'exactitude par M. Passot, chef de travaux du Laboratoire d'essai des matériaux de l'Ecole d'ingénieurs de Lausanne.

Il n'a épargné ni sa peine ni son dévouement pour accomplir des tâches parfois ingrates et obscures. Nous l'en remercions.

DIVERS

Pour le Rhône navigable.

M. le professeur A. Paris *a bien voulu marquer dans les lignes qui suivent, à l'intention de nos lecteurs, l'état actuel de la question du Rhône navigable. Les précisions données ici sont tirées du cinquième rapport annuel de la* Compagnie nationale du Rhône : *rapport technique de M.* J. Aubert, *ingénieur, directeur-général, et rapport du Conseil d'administration. Juin 1939. (Réd.)*

Ces deux documents solidaires, de 60 et 25 pages, le premier abondamment illustré de graphiques, de plans et de photogravures, nous renseignent sur l'avancement des travaux de la Compagnie nationale, dans ses trois domaines de la force motrice, de la navigation et de l'irrigation, au long de la vallée française de notre grand fleuve romand.

Le relief saisissant de l'argumentation montre la solidarité de ces trois champs d'action. Ainsi la navigation qui touche de si près à nos intérêts nationaux et économiques en l'état actuel de l'Europe, dépend à un haut degré du succès financier de l'entreprise productrice de l'énergie électrique.

Trois objets principaux fixent en ce moment l'activité technique de la Compagnie : le vaste chantier du *barrage de Génissiat*, dans les gorges du Haut Rhône, le *port Herriot* à Lyon, et l'aménagement de la passe navigable à l'origine du *delta de la Camargue et des travaux d'irrigation de la Crau.*

Le plus gros effort se donne à *Génissiat*, où les travaux dits préparatoires tendent à mettre à nu et au sec le fond rocheux du sillon du Rhône. La vaste fouille s'étend sur deux cents mètres, avec cinquante mètres de largeur sur les alluvions qui atteignent une profondeur d'une trentaine de mètres. La difficulté du problème de la coupure du Rhône résidait dans la grandeur du débit à détourner : 150 m³ d'eau par seconde à l'étiage minimum, dont il fallait profiter lors de l'établissement de programmes naturellement enchevêtrés. Une succession de quatre belles photographies illustre la maîtrise avec laquelle cette fermeture du lit naturel du fleuve a été effectuée.

La coupure a suivi l'ouverture des deux tunnels d'évacuation, mis en eau ce printemps. Les deux galeries, de 70 m² de section chacune, permettront d'évacuer les grandes crues normales de 1400 m³ par seconde à la vitesse de 10 mètres, assurée par la pente de 4 mm par m des sols bétonnés de quelque 600 mètres de longueur.

Avant même que le fleuve ait pu s'engouffrer sous les rochers calcaires des rives, on avait entrepris la coupure massive par le gros œuvre des enrochements. Partant pour cela des deux hardis ponts voûtés en béton armé, qui franchissent le Rhône aux extrémités du chantier, il fallait lutter de vitesse avec l'entraînement des blocs noyés dans les eaux de plus en plus impétueuses. Pour ramener au chiffre déjà gros de 22 000 mètres cubes l'amoncellement des blocs du bâtardeau aval, le plus exposé aux effets du courant, on augmenta la pente de son talus en retenant les blocs, de 20 à 150 kg, au moyen de « tétraèdes » ; ces squelettes de charpente formés de quatre cornières de 70 mm, étaient solidement amarrés à l'amont par des câbles retenus en eau dormante ; la pente de ruissellement put ainsi passer de 4 à 15 et même 20 %, réduisant à moins de cent mètres l'emprise des enrochements sur le lit. Le bâtardeau amont a demandé 18 000 m³, sans tétraèdres.

Ces empierrements assurent l'équilibre ; aux rideaux de palplanches, qu'ils contrebutent, incombe le rôle de l'étanchéité. Les parois métalliques jointives pénètrent de dix mètres dans le lit de gravier, atteignant alors les alluvions agglomérés par des injections de silicate ; ce mode opératoire s'est montré le plus économique malgré le haut prix du produit chimique ; des injections de ciment chassaient en effet le sable intercalaire au lieu d'en faire du mortier.

On active ces grands travaux, car la France a hâte de disposer à bref délai d'une importante source d'énergie électrique supplémentaire. Avant donc d'avoir terminé les travaux préparatoires, on amorce l'œuvre définitive pour rapprocher sensiblement l'échéance de mise en service de l'usine.

Ecartant, pour raison de sécurité, le souple projet primitif des usines jumelles sises en long des rives, de part et d'autre du canion, la décision actuelle vise une usine-barrage plus courte, placée en travers du lit. Le faible espacement de 25 mètres, qui restait entre les deux bâtiments symétriques de l'avant-projet, ne représente qu'une faible compensation à l'abandon des ailes. On prévoit par conséquent seulement six groupes turbo-alternateurs, mais d'une grande puissance individuelle de 65 à 80 mille kw. Quatre de ces groupes donnent 260 000 kw en première période, indépendamment de l'accumulation dans le Léman. Les deux derniers groupes, qui atteindront 80 000 kw si l'expérience le permet, suivront lorsque les besoins et les disponibilités y suffiront. Le raccourcissement des conduites forcées, enrobées dans le barrage-poids, a diminué le coup de bélier et permis de donner aux mêmes tôles d'enveloppes un diamètre de 5,75 m ; un débit supérieur pourra donc y passer le cas échéant, pour alimenter des turbines plus puissantes et réaliser éventuellement 480 000 kw dans un avenir lointain.

Ce rendement en pointe promet des ressources qui permettront, espérons-le, de réaliser prochainement la navigation commerciale sur le Haut-Rhône. Le plan, inséré au rapport, indique le facile emplacement du bief d'entrée au lac de retenue de Génissiat-Bellegarde-Estournelles (frontière suisse).

En attendant cette création grandiose, la Compagnie nationale construit à Lyon le *port Herriot*, dont la darse aux hydrocarbures et ses gros tanks figurent en belle photographie dans le rapport. Ce vaste port de commerce, progressivement