

Quelques propriétés du ciment et du béton: dilatation, retrait, élasticité

Autor(en): **Juillard, H.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizerische Bauzeitung**

Band (Jahr): **99/100 (1932)**

Heft 2

PDF erstellt am: **08.08.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-45523>

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.

INHALT: Quelques propriétés du ciment et du béton: Dilatation, retrait, élasticité. — Technische Methoden photoelastischer Forschung — Die „Privatklinik Hirslanden“ in Zürich. — Schweizerisches Luftverkehrswesen. — Mitteilungen: Betriebsmässige Entfernung des Sinters aus Rohrleitungen. Der Schweizerische Technikerverband. Glas aus Hochofenschlacke. Brücke über den Sambesi im Nyassaland.

Grossraum-Gelenkwagen für Nebenbahnen. Neubau der Schweizer. Kreditanstalt in Genf. Eidgen. Technische Hochschule. Die neue Seewasserversorgung für die Stadt Lausanne. — Nekrologe: Ernst Hofer. — Wettbewerbe: Erweiterungsplan der Stadt Bern und ihrer Vororte. Erweiterung des Schützen- und Gesellschaftshauses in Glarus. — Literatur. — Mitteilungen der Vereine.

Band 100

Der S. I. A. ist für den Inhalt des redaktionellen Teils seiner Vereinsorgane nicht verantwortlich.
Nachdruck von Text oder Abbildungen ist nur mit Zustimmung der Redaktion und nur mit genauer Quellenangabe gestattet.

Nr. 2

Quelques propriétés du ciment et du béton: Dilatation, retrait, élasticité.

Par H. JUILLARD, ingénieur-adjoint au directeur des „Kraftwerke Oberhasli A.-G.“, Innertkirchen.

RÉSUMÉ.

1. Le coefficient de dilatation thermique du ciment est en moyenne le même que celui de l'acier employé pour les armatures; l'allongement du ciment saturé d'eau qui est produit par les variations de température est un peu plus élevé et celui du ciment desséché, un peu plus faible que celui de l'acier.

Par contre, la plupart des ballasts utilisés pour la fabrication du béton ont un coefficient de dilatation linéaire qui n'est que la moitié de celui de l'acier. Le béton qui est un mélange de ciment et de ballast présente un coefficient de dilatation intermédiaire. Par exemple, la dilatation thermique du béton de granit atteint environ les $\frac{2}{3}$ de celle de l'acier.

2. Le ciment et le béton subissent dans l'eau un gonflement qui est avant tout la conséquence de l'hydratation; celle-ci se manifeste par une augmentation du poids spécifique du ciment, d'un ordre de grandeur dix fois supérieur à celui de l'augmentation du volume. Le gonflement du ciment immergé ne semble pas être entravé par une sollicitation extérieure à la compression; en tout cas le béton conservé sous l'eau ne présente pas, sous l'influence de la charge, l'augmentation progressive de la déformation que l'on constate avec le temps lors de l'exposition à l'air.

3. Dans l'atmosphère, même à 100 % d'humidité, une partie de l'eau, contenue dans les pores du béton ou du ciment, s'évapore; la quantité d'eau restante dépend directement du degré hygrométrique de l'atmosphère. La dessiccation produit une sollicitation interne qui est la cause du retrait. Il semble, néanmoins, que l'hydratation du ciment ne soit pas complètement interrompue par ce phénomène.

4. La quantité d'eau évaporée, de même que le retrait total subi par le ciment ou le béton à l'air, ne varient pas linéairement avec le degré hydrométrique pour lequel l'état d'équilibre s'établit. L'évaporation et le retrait sont les plus intenses pour les variations de l'humidité relative voisines de 100 %. La dessiccation jusqu'à 75 % d'humidité relative provoque un retrait atteignant déjà les $\frac{3}{4}$ du retrait total.

5. Au voisinage de 100 % d'humidité relative, le retrait produit une déformation permanente. Au-dessous, la déformation du béton non chargé augmente et diminue en fonction du degré hygrométrique. Les reprises du béton sont toutefois de plus en plus lentes, de sorte que l'influence des variations périodiques de l'humidité atmosphérique se faisant de moins en moins sentir, le retrait tend vers une valeur constante.

6. Le dosage du béton n'a pas une influence primordiale sur la valeur du retrait; au contraire, les bétons qui sont granulométriquement identiques présentent pratiquement le même retrait.

7. La charge a une grande influence sur le retrait qui est accéléré et amplifié lors de la compression et au contraire réduit et ralenti lors de la traction. La déformation permanente produite par le retrait est une fonction de la charge, de sorte que dans un grand nombre de constructions, la variation du retrait dû à la sollicitation a les mêmes conséquences qu'une variation du coefficient d'élasticité.

Au cours des dernières décades, les applications du béton sont multipliées sans cesse et s'étendent à des objets de dimensions toujours plus importantes. La connaissance des propriétés du béton n'a toutefois pas toujours précédé les applications pratiques. Bien que les recherches sur quelques propriétés particulières du béton aient été poussées très à fond, nous ne connaissons encore en général qu'imparfaitement cette matière. Cet état de choses incite les autorités compétentes des différents pays à vouer un très grand soin à l'établissement des prescriptions officielles concernant la fabrication des liants hydrauliques et les applications du béton. Ces prescriptions contiennent donc un résumé des propriétés du béton, considérées comme essentielles et des méthodes d'essais servant à les vérifier. Le béton de construction est contrôlé au moyen d'éprouvettes de forme cubique prélevées sur les chantiers; les échantillons sont essayés normalement à la compression, à l'âge de 28 jours, après avoir été conservés dans le sable humide. L'élément constitutif principal du béton, le liant, peut être contrôlé régulièrement au point de vue de la constance de volume et du temps de la prise. On détermine la résistance du ciment en le mélangeant dans une proportion de 1 : 3 à un sable normal caractérisé par un grain uniforme. Dans la plupart des pays, le mortier normal 1 : 3 est gâché avec une quantité minimum d'eau (8 à 10 %) et est pilonné dans les formes. Quelques pays admettent l'essai avec 11 % d'eau. Dans la pratique, on adopte pour les constructions nécessitant la manutention de grandes masses une consistance plastique du béton qui correspond à celle d'un mortier normal gâché avec 12 à 13 % d'eau.

Lorsqu'il s'agit de faire une classification de la qualité des ciments, la tendance actuelle est d'accorder une importance primordiale à la résistance à la compression des mortiers normaux 1 : 3, déterminée sur des prismes ou des cubes conservés dans l'eau pendant 28 jours. Cette manière d'estimer la valeur du ciment, en le soumettant à des conditions d'essais différant souvent notablement de celles de l'application pratique, ne peut être uniquement justifiée par des arguments positifs. On y a été conduit, au contraire, par les expériences peu satisfaisantes faites dans les laboratoires avec les autres essais du ciment: ni l'emploi d'éprouvettes de ciment pur, ni les différents modes de conservation des éprouvettes dans l'air ou alternativement dans l'air et dans l'eau, ni encore les essais de résistance à la traction et à la flexion ne donnent des résultats suffisamment réguliers pour servir de base à des normes précises. De même en ce qui concerne le contrôle du béton de construction, seul l'essai à la compression de cubes de béton prélevés sur les chantiers donne des résultats bien définis. C'est donc à ces circonstances qu'il faut attribuer le fait que l'on juge actuellement la qualité des bétons et des ciments uniquement sur la base de la résistance à la compression, déterminée sur des corps conservés dans l'eau ou dans une atmosphère très humide. La conséquence de cette conception unilatérale de la qualité du ciment et du béton est qu'on ignore souvent l'importance pratique des autres propriétés, qui, en définitive, déterminent ce qu'on pourrait appeler „la résistance totale“ et la durée de la construction établie.

Le béton est trop fréquemment traité, par analogie avec d'autres matériaux de construction, comme un corps

homogène jouissant dès qu'il est suffisamment durci de propriétés mécaniques invariables. En réalité les deux éléments constitutifs, le ciment et la matière interne du ballast, ne sont que juxtaposés et conservent chacun des propriétés différentes. Sous l'influence de la *température*, de la variation du *degré hygrométrique* du milieu ambiant et sous les *sollicitations mécaniques*, le ciment et la pierre se comportent différemment. Il en résulte des contraintes internes qui influent sur les propriétés élastiques et réduisent toujours la résistance apparente du béton. On peut, en général, ignorer sans inconvénients ces influences, tant qu'il ne s'agit que de constructions de dimensions restreintes, statiquement déterminées, dont le coefficient de sécurité est suffisamment élevé ou encore lorsque seule la résistance à la compression est utilisée, les autres efforts étant supposés supportés par une armature adéquate. Au contraire, pour les objets de grande importance dans lesquels on recherche une utilisation plus rationnelle des propriétés du béton, et surtout pour les systèmes hyperstatiques, il est indispensable de connaître exactement les propriétés élastiques de la construction projetée. Malheureusement, on ne dispose que de renseignements insuffisants sur la valeur des déformations produites par la température, le retrait et la charge, ce qui engage les constructeurs soit à élever le coefficient de sécurité de l'objet, si ces influences interviennent, soit à chercher à éliminer celles-ci autant que possible au moyen d'artifices de construction.

L'étude de ces questions revêtait une importance spéciale pour l'établissement du *barrage de la Spitalamm des „Kraftwerke Oberhasli.“* Des considérations de sécurité en premier lieu et d'économie ensuite ont conduit à adopter comme type de ce mur de 110 m de hauteur un barrage-voûte massif.¹⁾ L'avantage d'une telle construction est de présenter, sous la charge, des efforts plus réduits qu'un barrage-poids. L'inconvénient est que l'élasticité de la voûte diminue avec son épaisseur et que par conséquent les arcs massifs subissent des contraintes initiales plus élevées sous l'influence de la chaleur de prise et du retrait du béton. Pour éviter ces inconvénients, le barrage de la Spitalamm a été exécuté en segments séparés par des joints ouverts, et le programme d'exécution a été établi pour qu'il soit possible d'attendre que le béton se soit rétracté avant de remplir les joints. Les mesures à prendre pour fermer la voûte au moment le plus favorable et donner au barrage le caractère monolithique supposé par le calcul ne pouvaient être fixées que sur la base d'observations effectuées sur le mur lui-même. Nous ne nous étendrons pas, dans la note présente, sur les résultats particuliers des mesures des températures et des déformations du barrage en construction. Les observations seront poursuivies jusqu'après l'achèvement du mur et le remplissage du lac de la Grimsel, dans le but de déterminer le mode de travail effectif du barrage.

Les premiers résultats de ces observations, d'une part, et les expériences faites ailleurs sur la „plasticité“ du béton, d'autre part, ont montré l'opportunité d'effectuer des *essais systématiques*, pour élucider la question de l'influence de la *température*, du *retrait* et des *sollicitations mécaniques* sur la déformation du béton. Le but de ces recherches, exécutées dans le laboratoire des „Kraftwerke Oberhasli“ à Innertkirchen, a été complètement atteint. Il a été possible, non seulement de résoudre les problèmes posés par l'emploi du béton, dans le cas particulier de la construction d'un grand barrage arqué, mais de mettre en évidence plusieurs propriétés des ciments et des bétons actuellement insuffisamment connues. En raison de l'intérêt général que présentent ces questions, nous donnons dans cette note un aperçu sommaire des recherches effectuées et des résultats obtenus, bien que

¹⁾ Les mêmes considérations ont amené les ingénieurs américains à adopter un type de mur identique pour l'exécution du grand barrage Hoover dont la hauteur sera double de celle du barrage de la Spitalamm (voir „S. B. Z.“ vol. 99, page 81, 13 février 1932).

ceux-ci soient, à bien des égards, trop incomplets pour être généralisés. Conformément au but visé, seuls les ciments Portland (résistance normale exigée 450 kg/cm² à 28 jours) employés pour la construction des barrages de l'Oberhasli ont été soumis aux essais. De même tous les mélanges établis, ciment en pâte pure, mortiers et bétons ont été gâchés et composés en réalisant le plus possible la consistance et la composition granulométrique d'un bon béton de barrage, plastique sans excès d'eau. Tous les résultats des essais sont donc comparables entre eux pour ce qui concerne l'influence du dosage et des sollicitations extérieures; par contre les valeurs obtenues peuvent éventuellement être modifiées en fonction de la nature du ciment, de la granulométrie et de la quantité d'eau de gâchage. En outre, plusieurs séries d'essais ne sont pas encore terminées, certains mouvements ne se stabilisent même jamais d'une manière absolue. Il reste, on le voit, encore bien des points à préciser. C'est donc en formant le vœu que les résultats acquis susciteront de nouveaux points de vue et provoqueront de nombreuses recherches que nous résumons les essais effectués dans le laboratoire des KWO à Innertkirchen.

1. INFLUENCE DE LA TEMPÉRATURE SUR LE CIMENT ET LE BÉTON.

On considère aujourd'hui comme une connaissance acquise que la dilatation du béton peut être considérée comme étant identique à celle de l'acier. De cette concordance, on a conclu à la compatibilité du fer et du béton pour créer des constructions mixtes, travaillant d'une manière uniforme, même sous des températures différentes.

Les essais pour mesurer la dilatation thermique du ciment ou du béton ne sont pas simples à réaliser, surtout si l'on veut en déduire des résultats qui ne soient pas faussés par des phénomènes secondaires. Les perturbations qui rendent ces mesures délicates ont leur cause principale dans la propriété du ciment de libérer ou d'absorber une certaine quantité d'eau d'hydratation lorsque la pression de la vapeur d'eau du milieu ambiant varie. Il en résulte des variations de volume qui, en grande partie, ne peuvent plus être compensées lorsque la tension de la vapeur d'eau est ramenée à sa valeur primitive.

Il est très difficile, sinon impossible, d'élever la température d'un corps situé dans une atmosphère non saturée d'humidité tout en maintenant constantes et la quantité d'eau contenue dans ce corps et la pression de la vapeur d'eau de l'atmosphère ambiante. En général, l'échauffement produira une dessiccation du corps. Ainsi que nous le verrons plus tard, cette dessiccation est la cause d'un retrait du ciment, lequel ne s'opère pas en quelques heures, mais nécessite éventuellement plusieurs jours jusqu'à ce qu'un état d'équilibre s'établisse. Si le corps est saturé d'eau, il subit, au début de l'échauffement, une dilatation supplémentaire, due probablement à l'influence de la vapeur d'eau dans les pores qui exerce une pression interne, avant de se mettre en équilibre avec l'atmosphère extérieure. Dans ce cas, on mesure donc, au début, une dilatation trop grande, tandis que plus tard, le corps se rétractant, on observe une dilatation trop petite. Lorsqu'après l'échauffement, on abaisse la température jusqu'au point de départ, les phénomènes se produisent dans le sens inverse. Seulement le ciment est en général incapable d'absorber la quantité d'eau totale perdue lors de l'échauffement. Il en résulte des différences de longueur entre l'état initial et l'état final, de sorte que l'essai ne permet pas de conclusions précises.

Pour éliminer, tant qu'il est possible, l'apparition de tels phénomènes lors de la détermination de la dilatation thermique de corps à base de ciment, il est donc nécessaire d'effectuer les essais dans un milieu dont l'état hygrométrique ne puisse être modifié par le changement de température. Ces conditions seront remplies dans le cas de corps immergés dans l'eau ou dans le cas de corps desséchés, placés dans une atmosphère sèche.

a) Dilatation du ciment dans l'eau.

Bien que l'état hygrométrique du corps reste constant, puisqu'il y a sursaturation d'eau, il se produit néanmoins, lors de l'échauffement, un accroissement des dimensions qui subsiste lorsque la température est abaissée.

La propriété du ciment de se dilater dans l'eau même pendant une très longue durée, est connue depuis longtemps. On ignore par contre, en général, que cette propriété est fonction de la température à laquelle on conserve les éprouvettes. A basse température le gonflement ne s'opère que lentement, à température plus élevée, le mouvement est accéléré. Ce gonflement ne doit pas être confondu avec la dilatation thermique, il résulte nettement d'une absorption d'eau. Les observations faites sur des ciments conservés sous l'eau, dès le début de la prise (voir chap. IIa), permettent de constater que l'accroissement de volume ne résulte pas d'une dilatation des pores, mais de l'hydratation du ciment. Dès que la température est élevée, cette absorption est accélérée brusquement et les variations des dimensions en sont fortement influencées. Il est donc nécessaire de poursuivre les essais pendant une longue durée et d'attendre après chaque variation de température que le gonflement du corps reprenne la courbe régulière correspondant à la nouvelle température du bain. Lorsque la température est abaissée, le corps se raccourcit sous l'influence de la contraction thermique, tandis que le phénomène inverse de l'absorption constatée lors de l'élévation de la température, soit la restitution de l'eau absorbée, accompagné d'un retrait des dimensions, n'existe pour ainsi dire pas. Lors d'un nouvel échauffement, dans les mêmes limites de température, l'absorption est moindre que lors du premier échauffement. En soumettant ainsi le corps pendant une longue durée à des températures variables maintenues chaque fois plusieurs jours constantes, on arrive à déterminer les deux inconnues cherchées, c'est-à-dire le coefficient de dilatation thermique et le gonflement résultant uniquement de l'absorption d'eau.

Les essais ont été effectués avec des corps de ciment pur et de béton d'un dosage de 200 et 400 kg de ciment par m³, de 80 resp. 200 cm de longueur et 10 × 12 cm de section. Les variations de longueur étaient observées au moyen de comparateurs Stoppani au centième de millimètre. Les températures ont varié par étapes dans les limites de 8 à 60° C.

Les observations ont démontré que le ciment Portland étudié avait une dilatation thermique quelque peu supérieure à celle de l'acier. Par contre les bétons de 200 et 400 kg/m³ confectionnés avec un ballast d'origine granitique ont une dilatation inférieure d'un tiers à celle de l'acier (fig. 1).

On pouvait conclure de ces résultats que le ciment et la pierre ont des coefficients de dilatation différents.

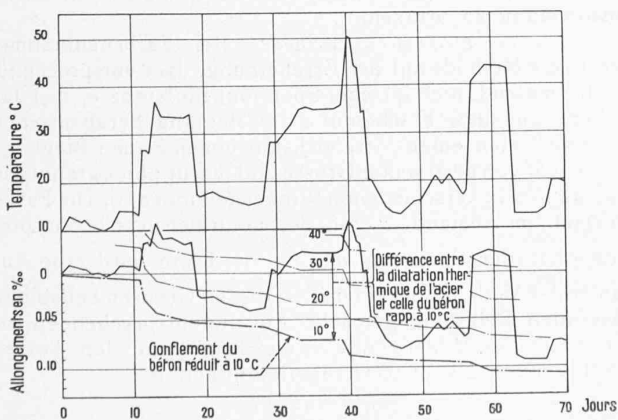


Fig. 1. Déformation linéaire d'une poutre de 2 m de longueur en béton à 400 kg de ciment par m³ immergée dans l'eau, en fonction de la température et du temps. Les appareils de mesure (comparateurs Stoppani) étant fixés à des tiges d'acier de même longueur que la poutre, on observe la différence entre la dilatation thermique de l'acier et celle du béton. On a déterminé $\alpha_{\text{Béton}} = 0,0000119 - 0,0000037 = 0,0000082 = -2/3 \alpha_{\text{Fer}}$.

Les essais effectués sur une poutre de granit de 2 m de longueur ont, en effet, montré que le coefficient de dilatation du granit n'atteint que la moitié de celui de l'acier ou du ciment. Nous constatons ainsi, au point de vue de la dilatation thermique, une différence de propriétés entre le ciment et la pierre qui a nécessairement pour conséquence l'existence de contraintes internes. Nous arriverons à la même conclusion en examinant d'autres propriétés du béton.

Il y a lieu de remarquer que non seulement le granit, mais aussi une grande partie des pierres d'origine sédimentaire présentent un coefficient de dilatation notablement inférieur à celui du ciment.

b) Dilatation thermique du ciment dans l'air sec.

Avant de mesurer la dilatation, il est nécessaire de dessécher complètement le corps et de s'assurer que les phénomènes de retrait sont terminés. Il convient, à cet effet, de placer l'éprouvette sous une cloche dont on chauffe l'air et dans laquelle on a placé également un récipient contenant du chlorure de calcium, par exemple. On s'assure pendant quelques jours qu'une variation de température ne provoque plus aucune déformation permanente du corps lorsque la température est ramenée à celle du début des essais. Dès que ceci est établi, les déformations observées dépendent uniquement de la dilatation thermique. Les mesures ont été effectuées sur des prismes de ciment pur d'une longueur de 16 cm au moyen de tensomètres donnant le millième de millimètre, et permettant l'évaluation du dixmillième, les appareils avaient été préalablement étalonnés pour différentes températures. Il ressort des observations que le coefficient de dilatation thermique du ciment en pâte pure, pratiquement complètement desséché, est légèrement inférieur à celui de l'acier.

Nous avons vu plus haut que le ciment saturé d'eau avait un coefficient de dilatation thermique quelque peu supérieur à celui de l'acier. La concordance des résultats des deux essais est donc satisfaisante, d'autant plus qu'il semble probable que la plus grande quantité d'eau contenue dans le ciment saturé (au moins 10 % du poids total) doit augmenter la dilatation apparente. (à suivre.)

Techn. Methoden photoelastischer Forschung.

Von R. V. BAUD, Dipl. Ing., Zürich.

(Schluss von Seite 4.)

Ermittlung des Hauptschubspannungsfeldes auf Grund der Gleichung (10).

a) Allgemeines. Gl. (3) und (10) lassen erkennen, dass die durch das zweite Polarisationsprisma durchgelassene Energie E nur von der ursprünglichen Energie E_0 und von der Phasenverschiebung Φ , bzw. von der Spannungsdifferenz $\sigma_1 - \sigma_2$ abhängt.

Als einfachste Energiequellen kommen Glühlampen in Frage, wie sie etwa bei Lichtbild- und Filmvorführungen verwendet werden. Benützt wurde vom Verfasser eine Wolfram-Glühlampe, mit der durch Kurve a (Abb. 10) gegebenen Energieverteilung. Damit man die endgültige Energie E erhält, muss jede Ordinate E_0 mit dem Wert $\sin^2 \frac{\Phi}{2}$ multipliziert werden. Diesen erhält man aus Abb. 11, indem man z. B. für $R = 1,5\mu$ und $\lambda = 0,55\mu$ die Punkte A und B ermittelt und den Wert $\sin^2 \frac{\Phi}{2} = 0,56$ unten links abliest.

Auf diese Weise lässt sich für $R = 1,5\mu$ die endgültige Energie (E Kurve b in Abb. 10) ermitteln. Eine solche Energieverteilung stellt nicht mehr „weisses“ Licht dar, sondern eine bestimmte Mischfarbe. Eine genaue Aussage über die Natur der Farbe auf Grund der Kurve b allein ist jedoch nicht möglich; es muss erst noch eine eingehendere Analyse vorgenommen werden.

Eine solche Untersuchung wurde für Gangdifferenzen von $R = 0$ bis $R = 2\mu$ ausgeführt¹³⁾. In dieser Untersuchung

¹³⁾ Baud und Wright: The Analysis of the Colors Observed in Photoelastic Experiments, „The Journal of the Optical Society of America“, Vol. 20, No. 7, July 1930, p. 381.