Zeitschrift: Bulletin technique de la Suisse romande

Band: 65 (1939)

Heft: 21

Artikel: Chaleur de prise et choix des ciments destinés à la construction des barrages

Autor: Stucky, A. / Derron, M.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-50015

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. 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. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

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. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

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. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 15.07.2025

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

65e année — 21 octobre 1939 — N° 21

BULLETIN TECHNIQUE
DE LA SUISSE ROMANDE

Paraissant tous les 15 jours

ABONNEMENTS :
Suisse : 1 an, 12 francs
Etranger : 14 francs
Pour sociétaires :
Suisse : 1 an, 10 francs
Etranger : 12 francs
Prix du numéro :
75 centimes.
Pour les abonnements s'adresser à la librairie F. Rouge & Cie, à Lausanne.

Organe de la Société suisse des ingénieurs et des architectes, des Sociétés vaudoise et genevoise des ingénieurs et des architectes, de l'Association des anciens élèves de l'Ecole d'ingénieurs de l'Université de Lausanne et des Groupes romands des anciens élèves de l'Ecole polytechnique fédérale. —

COMITÉ DE PATRONAGE. — Président : R. Neeser, ingénieur, à Genève ; Vice-président : M. Imer, à Genève ; secrétaire : J. Calame, ingénieur, à Genève. Membres : *Fribourg :* MM. L. Hertling, architecte ; A. Rossier, ingénieur ; *Vaud :* MM. F. Chenaux, ingénieur ; E. Elskes, ingénieur ; Epitaux, architecte ; E. Jost, architecte ; A. Paris, ingénieur ; Ch. Thévenaz, architecte ; *Genève :* MM. L. Archinard, ingénieur ; E. Odier, architecte ; Ch. Weibel, architecte ; *Neuchâtel :* MM. J. Béguin, architecte ; R. Guye, ingénieur ; A. Méan, ingénieur cantonal ; *Valais :* M. J. Dubuis, ingénieur, à Sion.

Rédaction : D. Bonnard, ingénieur, Case postale Chauderon 475, Lausanne.

ANNONCES
Le millimètre sur 1 colonne, largeur 47 mm :
20 centimes.
Rabais pour annonces répétées.
Tarif spécial pour fractions de pages.
Fermage des annonces :
Annonces Suisses S. A.
8, Rue Centrale (Pl. Pépinet)
Lausanne

CONSEIL D'ADMINISTRATION DE LA SOCIÉTÉ ANONYME DU BULLETIN TECHNIQUE
A. Stucky, ingénieur, président ; G. Epitaux, architecte ; M. Imer.

SOMMAIRE : *Chaleur de prise et choix des ciments destinés à la construction des barrages*, par A. Stucky, professeur à l'Ecole d'ingénieurs de Lausanne, et M. Derron, ingénieur. — *Quelles sont les caractéristiques du chauffage par rayonnement ?* (suite et fin). — *Société suisse des ingénieurs et des architectes : VIIIme Concours de la Fondation Geiser.* — Bibliographie. — Service de placement.

Chaleur de prise et choix des ciments destinés à la construction des barrages

par A. STUCKY, professeur à l'Ecole d'ingénieurs de Lausanne, et M. DERRON, ingénieur.

Introduction.

La première qualité qu'on exige d'un ouvrage en béton ou en béton armé, c'est de résister avec une certaine marge de sécurité aux charges les plus dangereuses qui peuvent lui être appliquées. Pour les constructions courantes, il suffit en général que cette résistance seule soit assurée. Quand il s'agit d'un *barrage*, on demande encore au béton d'offrir d'autres qualités techniques : étanchéité (par conséquent absence de porosité) et minimum de retrait, ainsi que certaines qualités pratiques nécessaires à l'exécution correcte de l'ouvrage ; savoir : plasticité suffisante, début de prise pas trop hâtif, durée de prise constante, bonne adhérence des reprises de bétonnage, etc. Ces diverses exigences ne sont qu'imparfaitement compatibles ; leur accord dépend au premier chef du ciment employé, et particulièrement des phénomènes qui accompagnent sa prise.

Importance de la chaleur dégagée par la prise du ciment.

La prise du ciment est un ensemble de réactions chimiques encore mal connues dans le détail, mais dont on sait depuis longtemps que la somme est nettement exothermique. Ce fait est sans grande importance pour la plupart des constructions de petites dimensions ou composées d'éléments minces en béton armé ; on lui voue par contre une attention croissante dans le choix des *ciments pour les barrages*. La *Commission internationale des grands barrages* a inscrit cette question à son programme d'études et des recherches sont poursuivies à ce sujet dans plusieurs pays. On en comprend sans peine le grand intérêt, si l'on songe qu'avec les masses toujours plus grandes de béton mises en œuvre, la radiation de la chaleur de prise est entravée à tel point qu'on a pu mesurer des élévations de température de 22 degrés par exemple, au barrage de la *Jogne* et dépassant 30 degrés à *Barberine*, portant à certains moments la température du barrage à 50 ou même 55 degrés.

L'effet du refroidissement, consécutif à cet échauffement important, se superpose à celui du retrait purement mécanique de la pâte liante et la fissuration de l'ouvrage est certaine, si des précautions spéciales ne sont pas prises. L'une de ces précautions, couramment appliquée, consiste à ménager des joints, dits de contraction, que l'on écarte aujourd'hui de 15 mètres environ, et à bétonner en éléments aussi petits que possible, de 2 à 3 mètres de hauteur et correspondant au volume du béton que l'on peut mettre en place par jour ou par demi-journée. Ces blocs ou ces voussoirs, comme on les appelle souvent, offrent une surface de rayonnement relativement grande par rapport à leur volume et facilitent ainsi la dissipation de la chaleur d'hydratation du ciment. On a tenté aussi de refroidir artificiellement le béton lors de la construction du *Boulder-Dam* en Californie, barrage de 230 mètres de hauteur, dont les dimensions dépassent donc de beaucoup ce qui a été réalisé en Europe. On cherche de plus en plus

à réduire l'élévation de température par l'emploi de ciments à faible chaleur d'hydratation. A ce sujet il est essentiel de distinguer nettement la rapidité de dégagement de la chaleur de prise d'une part et la quantité de chaleur dégagée au total après achèvement du durcissement d'autre part.

Bien souvent, les ciments proposés pour les barrages ne sont tout simplement que des ciments à prise lente ; leur dégagement de chaleur se répartit sur un temps relativement long, mais atteint au total une valeur comparable à celle des ciments ordinaires. La vraie solution ne peut pas être aussi simple. Pour des ouvrages minces, de grande surface relativement au volume, si la chaleur se développe très lentement, le rayonnement peut suffire à l'éliminer au fur et à mesure, et l'on n'observera pas d'élévation de température gênante dans le béton. Il peut être avantageux dans ce cas d'utiliser un ciment à prise lente, sans tenir compte de sa chaleur totale de réaction. Pour des ouvrages massifs construits par éléments, il peut être désirable au contraire que la chaleur de prise d'un bloc ou d'un voussoir se dégage rapidement, pour que la plus grande partie possible en soit dissipée avant le coulage des blocs voisins, formant enveloppe calorifuge pour le premier. L'allure de la courbe de dégagement de chaleur la plus favorable ne peut donc être fixée que pour des cas bien précis, sur la base d'une étude préliminaire de la distribution des températures au sein du massif, étude dans laquelle interviennent essentiellement l'échauffement interne et la conductibilité du béton, la forme de l'ouvrage et le régime de température de l'ambiance.

On sait que la chaleur de prise du ciment est étroitement liée à la résistance. D'une manière générale, la résistance est d'autant plus élevée que le dégagement de chaleur est plus grand. Or, on désire à la fois une bonne résistance et un dégagement de chaleur minimum. Comme c'est très souvent le cas, il faut trouver un compromis entre ces exigences contradictoires ; mais tandis qu'au moyen d'une granulation soignée des agrégats, et au besoin par l'adjonction de produits spéciaux comme la *Pouzzolane* ou le *Plastiment* on arrive assez facilement aujourd'hui à concilier par exemple la fluidité avec la compacité, ou une haute résistance avec un faible retrait, il est beaucoup plus difficile d'améliorer notablement la résistance sans sacrifier un peu les qualités thermiques ou vice versa.

Pour choisir entre deux ciments, dont l'un donne une résistance élevée avec un fort dégagement de chaleur, et l'autre l'inverse, ou pour juger si la diminution de résistance consécutive à une réduction du dosage en ciment est compensée par les avantages d'un moindre échauffement du béton, il est nécessaire d'établir un critère de comparaison objectif, logique, et pratiquement applicable. Ce critère doit se fonder sur une étude des propriétés thermiques des *bétons* et non sur celle des *ciments en pâte pure* ; le ciment ne doit pas être considéré uniquement en lui-même, indépendamment de ses conditions d'emploi, mais en relation avec les autres éléments auxquels il est destiné à être mêlé. Il n'est pas certain qu'en présence des agrégats le ciment conserve exactement les mêmes propriétés qu'en pâte pure, et en définitive, ce qui nous intéresse dans le ciment, ce sont les qualités qu'il communique au béton.

La réalisation des essais thermiques.

Dans le but de définir un critère de comparaison des ciments et d'étudier le processus du dégagement de chaleur pendant la prise des bétons, nous avons effectué depuis l'été 1936 environ deux cents essais systématiques sur des bétons de différents dosages en eau et en ciment, et fabriqués avec une quinzaine de ciments différents.

Une batterie de quatre *calorimètres adiabatiques*

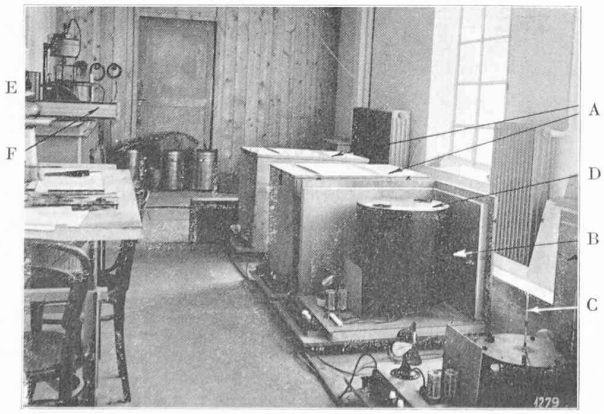


Fig. 1. — Batterie de quatre calorimètres adiabatiques et installations accessoires.

A. Calorimètres fermés. — *B*. Calorimètres ouverts. — *C*. Régulateur automatique à vapeur de chloroforme. — *D*. Cuve de protection. — *E*. Galvanomètre pour mesure des températures par couples thermo-électriques. — *F*. Echelle de lecture des températures.

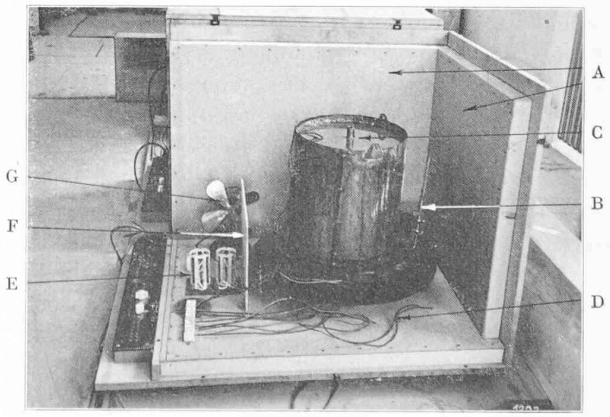


Fig. 2. — Calorimètre adiabatique, ouvert pour la préparation d'une expérience.

A. Parois calorifugées. — *B*. Régulateur automatique assurant la constante égalité de température entre le béton et l'air du calorimètre. — *C*. Eprouvette de béton frais. — *D*. Couple thermo-électrique (avant sa mise en place définitive). — *E*. Corps de chauffe maintenant la température de l'air égale à celle du béton. — *F*. Ecran de protection. — *G*. Ventilateur réalisant l'uniformité de température dans le béton.

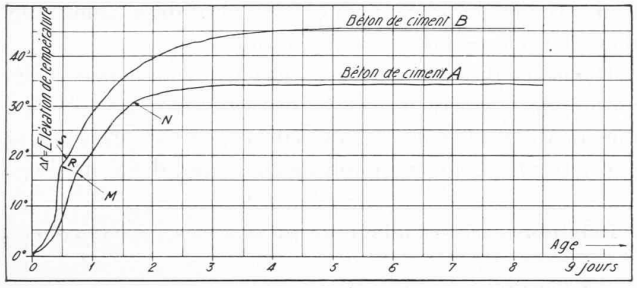


Fig. 3. — Elévation de température relevée sur deux bétons plastiques.

A. Béton à 300 kg/m³ de ciment Portland ordinaire. — *B*. Béton à 300 kg/m³ de ciment à haute résistance. — Eau de gâchage 7,12 % du poids des matériaux secs. — Granulation d'après la formule Bolomey $P = 12 + 80 \sqrt{\frac{d}{D}}$; $D = 40$ mm. Gravier concassé.

Aux points *M*, *N*, *R*, *S*, exemples de changements de pente brusques des courbes d'échauffement, correspondant à la fin de certaines réactions chimiques du ciment.

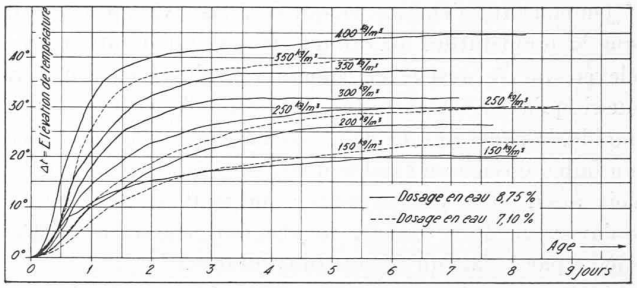


Fig. 4. — Elévation de température relevée sur des bétons à différents dosages d'un même ciment Portland ordinaire.

Granulation suivant la formule Bolomey $P = 12 + 88 \sqrt{\frac{d}{D}}$; $D_{max} = 40$ mm. Gravier concassé.

(fig. 1 et 2), inspirés du modèle préconisé par le *Comité international des ciments pour grands barrages*, et adaptés à l'étude des bétons, permet de suivre simultanément et très exactement le dégagement de chaleur à l'intérieur de quatre échantillons de béton d'une cinquantaine de kilos chacun. Chaque bloc de béton de 20 dm³ est entouré de deux cuves de protection, et d'une enceinte calorifugée. Un dispositif de chauffage, commandé par un régulateur automatique, très sensible, à vapeur de chloroforme, entretient dans le calorimètre une température constamment égale à celle qui règne à l'intérieur du bloc de béton. L'échantillon étant toujours à la même température que la couche d'air qui l'entoure, ne lui cède aucune chaleur et n'en reçoit pas davantage ; il se trouve dans les mêmes conditions qu'un bloc découpé par la pensée au centre d'un grand barrage et protégé par toute la masse de béton environnante, pratiquement à la même température que lui. Six couples thermo-électriques par calorimètre, deux dans le béton et quatre entre les cuves de protection, permettent de relever à tout instant la montée de la température dans l'éprouvette, et de contrôler que le fonctionnement normal du régulateur maintient constamment l'égalité de température désirée.

Connaissant la chaleur spécifique du béton, mesurée d'autre part dans un calorimètre spécial, on déduit de l'élévation de température le nombre de calories dégagées par le ciment.

Résultat des essais thermiques.

Le graphique fig. 3 montre les élévations de température relevées sur deux bétons plastiques au dosage de 300 kg.CP/m³, fabriqués avec deux ciments différents, un ciment ordinaire A et un ciment spécial à haute résistance B.

Ces courbes ne sont qu'un exemple parmi les nombreux essais que nous avons réalisés ; elles montrent certaines particularités qu'on observe d'une manière générale pour tous les ciments Portland.

On constate que, très grossièrement, la courbe d'échauffement a l'allure d'une fonction exponentielle du temps. L'échauffement, très marqué au début, diminue notablement d'intensité au bout de quelques jours déjà ; 7 à 15 jours après le gâchage, on peut dire que la température maximum est pratiquement atteinte ; l'augmentation de température devient alors si faible qu'elle tombe à la limite de précision des mesures ; elle est négligeable par rapport à l'échauffement initial.

La courbe d'échauffement n'a pas l'allure parfaitement régulière d'une courbe mathématique ; elle est formée de plusieurs tronçons et peut accuser des points anguleux. Ces singularités ne proviennent pas d'inexactitudes de mesure ; elles traduisent des propriétés réelles du phénomène. La prise du ciment comporte en effet la formation de plusieurs catégories de sels, dont la combinaison exige des temps différents pour chaque espèce. A un moment donné, certains sels ont achevé leur hydratation, alors que d'autres sont encore en pleine réaction ; on conçoit qu'à ce moment, une source de chaleur étant tarie, l'échauffement diminue brusquement d'intensité, et la courbe présente un angle. Si le tracé d'une courbe régulière et schématique parmi les points relevés expérimentalement peut faciliter une mise en équation et l'application du calcul, il faut bien observer que c'est un schéma commode pour l'ingénieur, mais que ce n'est pas une représentation fidèle dans le détail des phénomènes réels.

On peut relever dans la plupart des essais, peu d'instants après le gâchage et pendant quelques heures, une montée initiale de la température, de 1 à 2°. L'échauffement subit un temps d'arrêt, puis reprend avec une intensité généralement beaucoup plus forte qu'au début. On explique ce phénomène par l'hydratation presque immédiate du gypse que le ciment contient toujours en petites quantités, tandis que l'hydratation des aluminates et silicates de chaux, constituant à proprement parler la prise, ne commence que plus tard.

Le graphique fig. 4 montre les élévations de température relevées sur des bétons à différents dosages d'un même ciment. Les courbes en trait plein représentent des bétons gâchés avec 8,75 % d'eau, celle en pointillé des bétons gâchés avec 7,8 % d'eau.

On constate d'emblée, ce qui semblait évident *a priori*, que la température maximum atteinte est d'autant plus élevée que le dosage en ciment est plus fort ; on voit aussi qu'avec un fort dosage, l'échauffement est plus rapide, la pente initiale de la courbe plus brusque qu'avec un faible dosage ; il semble que la température maximum soit aussi plus vite atteinte ; on peut se représenter qu'avec un fort dosage, la réaction s'accélère d'elle-même par le fait qu'elle est plus intense.

L'élévation de température croissant avec le dosage, on se demande immédiatement si ces deux grandeurs sont proportionnelles, ce qui reviendrait à dire que la quantité de chaleur dégagée par un kilo de ciment est constante. Toutes nos expériences nous ont montré que ce n'était pas le cas. Sur la base d'un grand nombre d'essais à différents dosages d'un béton de ciment Portland ordinaire, et d'essais sur 15 ciments différents d'origines suisse et française, nous avons établi les deux lois statistiques suivantes :

1. *Pour différents bétons d'un même ciment, gâchés avec une même quantité d'eau, la quantité totale de chaleur dégagée par un kilo de ciment diminue quand on augmente le dosage.*

Dans un mortier à riche dosage, on rencontre en certains points des sortes de noyaux, formés de grains de ciment. Les grains à la périphérie du noyau s'hydratent les premiers et forment une pellicule étanche qui empêche ou gêne du moins l'hydratation du centre. Ce fait peut être contrôlé par des observations au microscope. On trouve ainsi dans de très vieux mortiers, des grains de ciment qui n'ont jamais pu s'hydrater. En broyant une galette de pâte pure de ciment ayant durci plusieurs mois, on obtient une poudre capable de s'hydrater à nouveau en donnant une faible résistance. Dans un mortier maigre, au contraire, les grains de ciment beaucoup plus dispersés s'hydratent plus facilement, et la réaction est plus complète. Puisqu'en augmentant le dosage, on diminue le pourcentage des grains qui réagissent, on conçoit aisément que la quantité de chaleur dégagée en moyenne par un kilo de ciment soit plus faible.

2. *Pour différents bétons de même dosage en ciment, fabriqués avec un liant donné, la quantité de chaleur dégagée par un kilo de ciment varie, et tend généralement à diminuer, si l'on augmente la quantité d'eau de gâchage.*

Considérons un mortier assez pauvre en ciment pour que tous ses grains puissent réagir sans être emprisonnés par des voisins plus avides d'eau ou mieux placés. Puisque la chaleur de réaction varie avec la quantité d'eau de gâchage, dont tous les grains disposent également, on doit admettre que le ciment produit des combinaisons différentes suivant la quantité d'eau disponible. On observe des variations d'amplitude différentes, et même de sens opposés, suivant les ciments étudiés.

Les deux lois statistiques précédentes justifient et renforcent notre affirmation du début, qu'il ne suffit pas, pour choisir un ciment de barrage, d'étudier une pâte pure ou un mortier type tout à fait théorique, mais qu'il faut étudier le ciment dans ses véritables conditions d'emploi, c'est-à-dire dans le béton.

On ne peut pas non plus considérer séparément l'élévation de température et la résistance ; il faut établir une méthode d'essais et un critère de comparaison qui permettent de juger simultanément ces deux qualités.

Relation entre « chaleur de prise » et « résistance ».

La fonction $q = f\left(\frac{C}{E}\right)$.

Elévation de température et résistance du béton croissent avec le dosage en ciment. Moyennant certaines précautions, on peut trouver une relation entre la chaleur de prise et la résistance, en faisant appel à la notion du *facteur ciment sur eau* C/E, C étant le poids du ciment et E le poids d'eau contenu dans un m³ de béton. Les travaux de M. le professeur *Bolomey* ont établi que, pour un ciment donné, la résistance du béton est en première approximation proportionnelle à C/E. Dans les conditions habituelles, elle ne dépend pas du dosage absolu en ciment, mais simplement du rapport des dosages en ciment et en eau.

La quantité de chaleur développée au sein d'un m³ de béton dépend du dosage absolu en ciment ; elle ne saurait être proportionnelle à C/E. Mais la statistique montre que la quantité finale de chaleur dégagée par un kilo de ciment est *à peu près constante* pour un C/E donné, et varie avec ce facteur. La quantité de chaleur dégagée par un kilo de ciment apparaît comme une variable caractéristique du ciment. Nous convenons de désigner sa valeur par q. En reportant en diagramme la fonction $q = f(C/E)$, on constate que pour des bétons de même consistance, q diminue quand C/E augmente ; la relation entre q et C/E peut être représentée par une droite ; avec la plupart des ciments, pour un C/E donné, q est plus élevé dans un béton sec que dans un béton plastique, et plus élevé dans un béton plastique que dans un béton coulé. Cette différence n'est que de quelques pourcents entre les limites pratiques extrêmes du béton sec et du béton coulé.

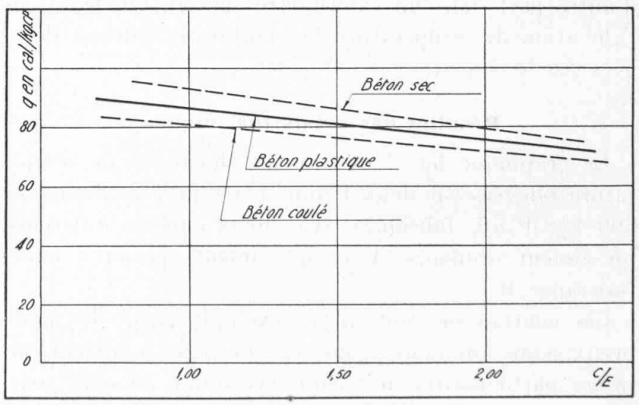


Fig. 5. — Représentation schématique du dégagement de chaleur q d'un kilo de ciment en fonction du rapport ciment sur eau C/E.

Nous sommes ainsi conduits à schématiser par des droites variables avec la plasticité, des faits certainement très compliqués dans leur essence, conformément au schéma de la figure 5.

Dans l'interprétation de ce schéma, il est essentiel de remarquer que pour des bétons à même C/E, c'est-à-dire de même résistance, plus la fluidité augmente, bien qu'en général la quantité de chaleur dégagée par un kilo de ciment diminue, la quantité de chaleur dégagée au total augmente. L'élévation de température de la masse est plus forte, parce qu'un béton coulé contient par m³ plus de ciment qu'un béton sec de même C/E.

Ainsi se justifie à nouveau la règle bien connue des praticiens du béton, qu'il faut chercher à réaliser une résistance donnée avec le béton le plus sec possible, la quantité d'eau minimum étant déterminée par les conditions d'une bonne mise en place du béton.

Il est pratiquement possible de caractériser les qualités thermiques du ciment par la droite $q = f(C/E)$ pour la consistance plastique ; il suffit de se rappeler que pour des bétons très secs ou pour des bétons coulés, les valeurs ne sont justes qu'à quelques pourcents près. Si l'on désire comparer des bétons très différents de la consistance moyenne habituelle, très secs ou très fluides, et si l'importance de la question thermique justifie une étude spéciale, on pourra du reste déterminer facilement par quelques essais la droite correspondant pour chaque ciment à la consistance désirée.

La mesure de la résistance.

On peut caractériser les qualités mécaniques du béton par la résistance R à la compression de cubes, ou par la résistance F à la flexion de prismes. Nous avons déterminé la résistance à la flexion de prismes en mortier extrait du béton, suivant la méthode proposée par M. le professeur *Bolomey*. Ce procédé nous a donné des résultats tout à fait satisfaisants, d'autant plus que nous désirions faire avant tout des essais comparatifs.

Les essais de flexion permettent d'évaluer la résistance à la compression du béton. Il suffit de déterminer au préalable la relation entre R et F pour le genre de bétons étudiés, par des essais simultanés de flexion et de compression. D'après les données du Laboratoire d'Essais de matériaux de Lausanne, on peut admettre en première approximation :

$$\text{Log } R = 1{,}4 \text{ Log } F$$

Les critères de qualité des ciments.

Nous traiterons ici plus spécialement le cas de bétonnage en grosses masses, tel qu'il se présente dans la construction des barrages-réservoirs. La conductibilité et le rayonnement sont si faibles, qu'au centre d'un bloc la déperdition de chaleur n'a pas le temps de se faire sentir avant que le dégagement de la chaleur d'hydratation soit pratiquement achevé. On peut calculer aisément, ou observer sur les barrages en construction, que l'équilibre thermique n'est rétabli, c'est-à-dire que la chaleur de prise ne s'est entièrement dissipée qu'au bout de nombreux mois ou même de plus d'une année s'il s'agit de gros barrages poids.

Dans ce qui va suivre immédiatement, nous ne tiendrons pas compte de l'allure de la courbe d'élévation de température pour considérer uniquement le maximum atteint, c'est-à-dire la quantité de chaleur développée par le ciment.

On peut choisir comme *premier critère* la quantité de chaleur dégagée par kilogramme de ciment rapportée à la résistance F. Ce critère $\left(\frac{q}{F}\right)$ s'applique au cas où l'on doit choisir un ciment destiné à la fabrication d'un béton de dosage et de consistance connus.

Un essai thermique donne pour tous les ciments la valeur de q dans les conditions imposées, soit un point particulier de la droite caractéristique $q = f(C/E)$. Le dosage étant le même pour tous les bétons considérés, la chaleur dégagée au total est proportionnelle au nombre q de calories dégagées par un kilo de ciment. Dans ce cas, la valeur de q est une mesure comparative de l'élévation de température de chaque béton. En rapportant q à la résistance à la flexion F de chaque échantillon, on obtient un critère de qualité q/F d'autant meilleur qu'il est plus petit, à la condition, naturellement, que F atteigne au moins la valeur minimum fixée par les ordonnances et le cahier des charges. En effet, un rapport q/F élevé indique soit un ciment qui dégage beaucoup de chaleur relativement à sa résistance, soit un ciment qui donne une faible résistance relativement à son dégagement de chaleur.

Un *second critère* est l'élévation de température en fonction de la résistance, $\triangle t = f(R)$. Le critère q/F s'applique au cas de bétons d'un dosage bien déterminé. D'une manière tout à fait générale, le problème est moins précisément défini. Ce qu'on désire, c'est obtenir avec un béton de consistance convenable, une certaine résistance, en fonction de laquelle le dosage sera déterminé plus tard. Nous choisissons alors un autre critère de qualité, plus général, mais aussi plus long à établir, en disant : Le ciment le meilleur est celui qui donne la résistance désirée en produisant le moins d'échauffement dans le béton.

$\triangle t$ étant l'élévation de température et R la résistance, nous cherchons pour chaque ciment la fonction $\triangle t = f(R)$ correspondant au béton de consistance voulue, puis sa valeur particulière pour la résistance R désirée.

Cette fonction s'établit très facilement si l'on connaît pour chaque ciment la « droite thermique » caractéristique $q = f(C/E)$ et la « droite de résistance » $R = f(C/E)$ ou le facteur K de la formule $R = K(C/E - 0{,}50)$ qui la caractérise. A une résistance donnée correspond une valeur bien définie de C/E ; pour que le béton ait la consistance imposée, il faut d'autre part une quantité d'eau déterminée ; ces deux conditions fixent le dosage en ciment. Connaissant C/E, on trouve sur la droite thermique la valeur correspondante de q. Le dosage en ciment permet de calculer le nombre total de calories développées

dans un m³ de béton, et par conséquent, l'élévation de température; dans ce calcul, on peut admettre pour le béton une chaleur spécifique moyenne de 0,22 cal/kg/degré C.

On peut calculer par ce procédé les élévations de température correspondant à différentes valeurs de la résistance et tracer une courbe $\triangle t = f(R)$ pour chaque ciment. Pour n'importe quelle résistance demandée, on peut ainsi déterminer d'avance quelle sera l'élévation de température d'un béton de la consistance choisie. Si l'une des courbes est constamment plus basse que toutes les autres, on pourra dire qu'aux deux points de vue chaleur et résistance considérés simultanément, le ciment correspondant donne toujours les caractéristiques les plus favorables.

Exemples.

Application du critère q/F.

Lors de l'étude des ciments destinés au barrage des *Beni-Bahdel* en Algérie, nous avons examiné un certain nombre de ciments français, et à titre de comparaison, des ciments suisses de bonne qualité ; nous avons également étudié l'influence de l'adjonction au ciment de 1 % en poids de *Plastiment*, produit qu'on avait déjà utilisé avec avantage pour les travaux d'aménagement de la *Tafna*. Le graphique fig. 6 donne un exemple de l'application à ces ciments du critère q/F à 7 et 28 jours, pour des bétons de même consistance plastique, au dosage de 300 kg/m³, avec et sans *Plastiment*.

Un graphique de ce genre permet une première élimination des ciments qui dégagent beaucoup de chaleur par rapport à la résistance, comme C, H ou I par exemple. La préférence doit être donnée à des ciments tels que G ou L, dont le dégagement de chaleur est relativement faible, pour une résistance que par ailleurs on a reconnue suffisante. Ce classement limite beaucoup le nombre des ciments en concurrence, parmi lesquels les autres conditions permettent de fixer le choix définitif.

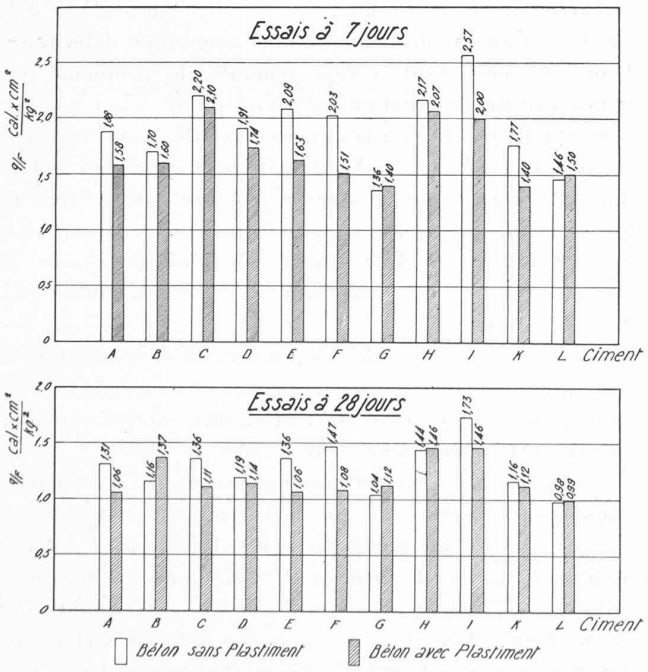


Fig. 6. — Valeurs à 7 et à 28 jours du rapport q/F, de la quantité de chaleur dégagée par kg ciment sur la résistance à la flexion, pour des bétons de différents ciments. Tous les bétons, avec ou sans *Plastiment*, sont gâchés à la même consistance, et gradués suivant la formule $P = 12 + 88 \sqrt{\frac{d}{D}}$, avec $D_{max} = 40$ mm.

Remarquons en passant que dans la plupart des cas, le *Plastiment* diminue la quantité de chaleur dégagée par kilo de ciment, relativement à la résistance. Cet effet semble d'autant plus marqué que la chaleur de prise du ciment pur est plus forte.

Application du critère $\triangle t = f(F)$.

Dans une étude plus approfondie, nous avons déterminé les droites $q = f(C/E,)$ $F = f(C/E)$ et les courbes $\triangle t = f(F)$ de 8 ciments, données respectivement par les graphiques de la figure 7.

Si l'on désire par exemple une résistance à la flexion de 40 kg/cm² à 7 jours, correspondant approximativement à une résistance à la compression de 200 kg/cm², on trouve sur le graphique fig. 7 les élévations de température indiquées dans le tableau suivant.

Ciment	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
Δt sans Plastiment	52°	37°5	36°	47°	43°	47°	49°	37°
Δt avec Plastiment	41°	34°	39°	35°	37°	34°	37°	32°

Elévation de température de bétons à même consistance plastique fabriqués avec les ciments I à VIII, et donnant à 7 jours une résistance à la flexion de 40 kg/cm².

Le ciment qui donne la moindre élévation de température est dans ce cas le n° III ; avec *Plastiment*, c'est le n° VIII.

On voit encore sur le graphique que dans 7 de ces 8 cas examinés, l'adjonction au ciment de 1 % en poids de *Plastiment* permet d'obtenir avec une moindre élévation de température la même résistance que si l'on n'avait pas employé de *Plastiment*. L'importance de cet avantage varie avec le ciment employé. Dans le huitième cas (ciment n° III) l'adjonction de *Plastiment* apparaît encore avantageuse pour les forts dosages.

Conclusions.

Dans le choix du ciment pour un barrage, la chaleur de prise est à considérer avec la même attention que les autres qualités habituellement requises du béton. L'élévation de température est particulièrement importante dans les bétonnages en grosses masses, où elle doit être examinée parallèlement à la résistance mécanique. L'étude qui précède indique une méthode permettant de juger simultanément ces deux qualités pour des bétons de consistance donnée. Suivant l'importance de l'ouvrage et les conséquences que peut avoir l'élévation de température (conséquences dépendant de la forme et de la masse de l'ouvrage) on fera usage :

soit du *critère de comparaison* q/F, chaleur dégagée par kg de ciment, rapportée à la résistance à la flexion du béton, qui n'exige en principe qu'un essai thermique et un essai de résistance dans les conditions de dosage et de consistance données,

soit de la *fonction* $\triangle t = f(R)$, élévation de température correspondant à la résistance désirée pour un béton de consistance donnée, fonction dont la détermination implique la connaissance de la droite thermique $q = f(C/E)$ et du facteur K de résistance du ciment.

Ces considérations permettent, pour des bétons destinés à des ouvrages massifs, de classer les ciments au double point de vue de la chaleur de prise et de la résistance, et de juger en outre de l'influence d'un produit modifiant les propriétés du ciment. Jointes aux autres conditions dont il faut tenir compte dans chaque cas particulier, elles facilitent le choix judicieux du ciment le mieux approprié.

Lausanne, avril 1939.

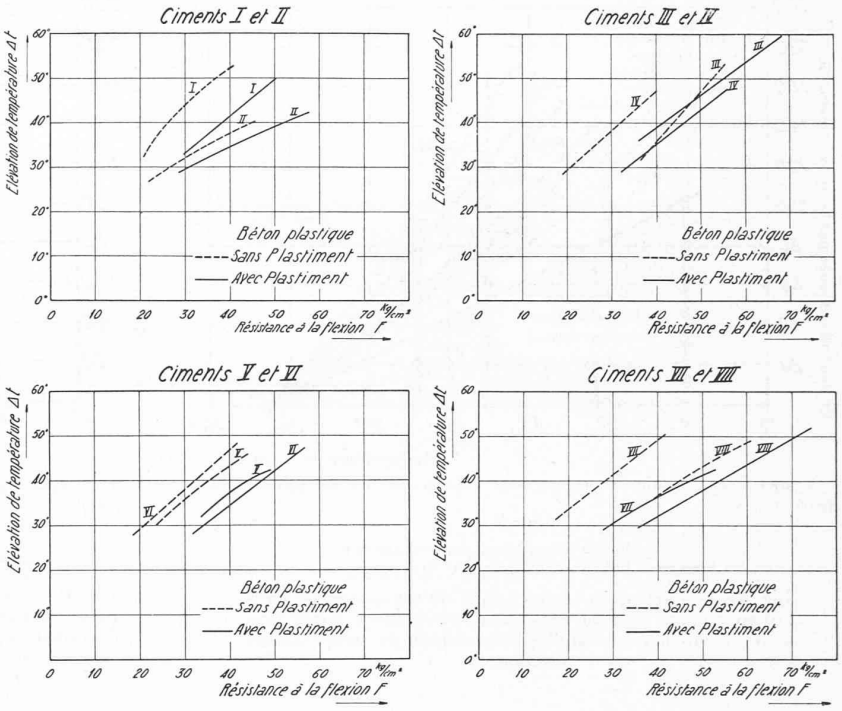


Fig. 7. — Elévation de température en fonction de la résistance déterminée pour des bétons plastiques de différents ciments.

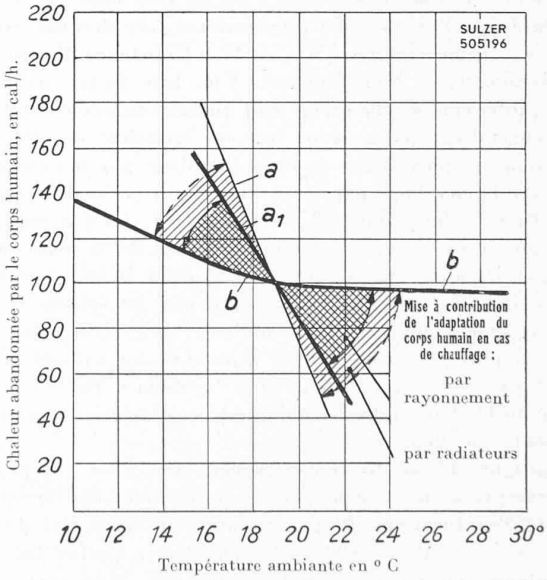
Granulation : $12 + 88\sqrt{\frac{d}{D}}$; $D = 40$ mm. Gravier concassé.

Quelles sont les caractéristiques du chauffage par rayonnement ?

(Suite et fin).[1]

Nous pensons intéresser nos lecteurs et spécialement les architectes en reproduisant ici l'essentiel d'un article paru dans la Revue technique Sulzer, *n° 2, 1939, sous la signature* Wth. *Pour ceux que cette question intéresse particulièrement nous leur rappelons que le* Bulletin *a déjà publié sur cette matière plusieurs articles et notes* [2]. *(Réd.)*

Le chauffage par rayonnement entraîne, pour une même quantité de chaleur évacuée par convection, c'est-à-dire pour une même température ambiante, une réduction de la perte totale de chaleur du corps ; la ligne de déperdition de chaleur « a » dans la figure 7 est donc moins inclinée. Le chauffage par rayonnement met moins à contribution la faculté d'adaptation du corps humain, comme le fait ressortir la comparaison des courbes a et a_1 de la figure 10. Il est vrai qu'il n'est pas possible de supplanter complètement cette faculté d'auto-adaptation du corps, et l'avantage essentiel du chauffage par rayonnement consiste dans la possibilité d'abaisser la température de l'air ambiant, puisqu'il permet d'augmenter la proportion de chaleur dissipée par convection ; on le voit sur la figure 11 qui montre, rapportée à une température superficielle du corps de 24,5°, la déperdition totale de chaleur partagée entre le rayonnement et la convection. Pour provoquer une déperdition totale (sans évaporation) de 80 calories par heure, il est nécessaire de chauffer l'air ambiant à environ 19° C, en s'en tenant, pour un local chauffé par rayonnement, à une proportion moyenne de chaleur rayonnée se montant à 52 % de la convection. Si l'on se base sur



Légende :

a Perte de chaleur avec chauffage par convection

a[1] Perte de chaleur avec chauffage par rayonnement

b Courbe d'auto-adaptation (y compris l'évaporation) d'une personne normalement habillée.

Fig. 10. — Mise à contribution de l'auto-adaptation du corps humain avec le chauffage par rayonnement et le chauffage par radiateurs.

[1] Voir *Bulletin technique* du 23 septembre 1939, p. 251.

[2] Entre autres : *Le chauffage par rayonnement*, par M. *A.-G. Bertusi*, ingénieur, « Bulletin technique » du 7 mai 1938, p. 129.