

Zeitschrift: Bulletin technique de la Suisse romande
Band: 73 (1947)
Heft: 17

Artikel: Les ciments expansifs et l'autocontrainte du béton
Autor: Lossier, Henry
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-55145>

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: 04.05.2025

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

BULLETIN TECHNIQUE

DE LA SUISSE ROMANDE

Paraissant tous les 15 jours

ABONNEMENTS :

Suisse : 1 an, 20 francs
Etranger : 25 francs

Pour sociétaires :

Suisse : 1 an, 17 francs
Etranger : 22 francs

Prix du numéro :
1 Fr. 25

Pour les abonnements
s'adresser à la librairie
F. Rouge & C^{ie}, 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 polytechnique 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 : G. EPITAUX, architecte, à Lausanne ; secrétaire : J. CALAME, ingénieur, à Genève. Membres : *Fribourg* : MM. L. HERTLING, architecte ; P. JOYE, professeur ; *Vaud* : MM. F. CHENAUX, ingénieur ; E. ELSKES, ingénieur ; E. D'OKOLSKI, architecte ; A. PARIS, ingénieur ; CH. THÉVENAZ, architecte ; *Genève* : MM. L. ARCHINARD, ingénieur ; E. MARTIN, architecte ; E. OPIER, architecte ; *Neuchâtel* : MM. J. BÉGUIN, architecte ; G. FURTER, ingénieur ; R. GUYE, ingénieur ; *Valais* : M. J. DUBUIS, ingénieur ; A. DE KALBERMATTEN, architecte.

RÉDACTION : D. BONNARD, ingénieur, Case postale Chauderon 475, LAUSANNE.

Publicité :
TARIF DES ANNONCES

Le millimètre
(larg. 47 mm.) 20 cts.
Réclames : 60 cts. le mm.
(largeur 95 mm.)

Rabais pour annonces
répétées.



ANNONCES-SUISSES S.A.
5, rue Centrale Tél. 2.33.26
LAUSANNE
& Succursales.

CONSEIL D'ADMINISTRATION DE LA SOCIÉTÉ ANONYME DU BULLETIN TECHNIQUE

A. STUCKY, ingénieur, président ; M. BRIDEL ; G. EPITAUX, architecte ; R. NEESER, ingénieur.

SOMMAIRE : *Les ciments expansifs et l'autocontrainte du béton* (suite et fin), par HENRY LOSSIER. — *Calcul de blindages circulaires pour galeries sous pression*, par J. TRÜB, ingénieur. — *NÉCROLOGIE* : † Gunnar Hammershaimb. — *BIBLIOGRAPHIE*. — Société suisse des ingénieurs et des architectes : 60^e assemblée générale, à Davos. — *SERVICE DE PLACEMENT*.

Les ciments expansifs et l'autocontrainte du béton¹

par HENRY LOSSIER

C. D. 624.012.47

(Suite et fin).²

Applications des ciments expansifs.

(Suite.)

c) Réparation d'ouvrages en béton armé sinistrés.

Le pont à double voie normale dit « de Moscou », près de Montereau, offre un cas frappant d'ouvrage en béton armé sinistré remis en état à l'aide des ciments expansifs.

C'est un ouvrage pour double voie normale qui comporte quatre travées de 26 m de portée en poutre continue de hauteur variable.

Lors de leur retraite, en 1944, les Allemands avaient tenté de le détruire en plaçant des torpilles à la partie supérieure du tablier.

Mieux que toute description, les figures 30 et 31 vous montreront dans quel état était l'ouvrage lorsque sa remise en état nous fut confiée.

Les brèches étant retaillées et des armatures de remplacement disposées entre celles rendues inefficaces (fig. 32), il convenait de rétablir l'état de contrainte antérieur dans les parties à reconstituer.

Si l'on s'était contenté de reconstituer les parties manquantes avec des bétons ordinaires, le retrait de ceux-ci, tendant à rompre le contact avec l'ancien béton, aurait rendu la réparation partiellement inefficace. Leur rôle ne se serait

affirmé, en effet, que sous des efforts relativement élevés, c'est-à-dire lorsque les raccourcissements élastiques et plastiques du béton auraient dépassé l'intensité du retrait lui-même.

Aussi, partout où la chose fut possible, avons-nous rétabli les parties manquantes avec du béton de ciment fortement expansif, que sa poussée dynamique mettait en compression en tous sens, rétablissant ainsi, au moins partiellement, l'état de contrainte antérieur de l'ouvrage.

Le pont de Moscou, avant d'être remis en service, a subi des essais concluants et ne porte plus aujourd'hui aucune trace apparente de ses blessures.

d) Applications diverses des ciments expansifs.

L'énergie dynamique des ciments expansifs est mise en jeu par toute entrave, quelle qu'elle soit, qui s'oppose à leur gonflement.

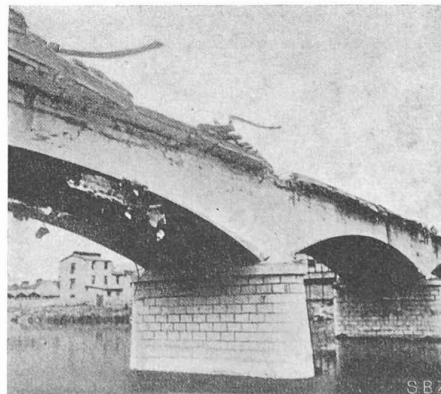


Fig. 30. — Pont de Moscou, près de Montereau.
Etat de l'ouvrage avant la remise en état.

¹ Conférence donnée à Zurich le 1^{er} février 1947, sous les auspices du Groupe des ponts et charpentes de la Société suisse des ingénieurs et des architectes.

² Voir début de ce texte au Bulletin technique du 2 août 1947, p. 221.

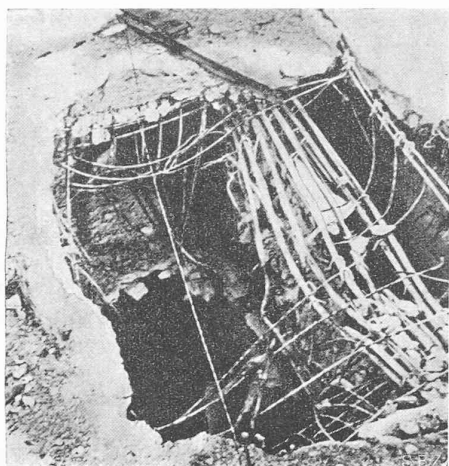


Fig. 31. — Pont de Moscou.
Armatures principales détruites.

Cette entrave est réalisée, en général, soit par des armatures métalliques extérieures ou enrobées, soit par une butée contre des maçonneries ou des terrains.

Il en résulte alors, de façon automatique :

- Dans le cas d'armatures, une mise en traction des aciers et une compression corrélative du béton, compression qui est notamment fonction de la répartition et du pourcentage du métal ;
- dans le cas de terrains ou maçonneries, un effort de compression contre ces derniers d'une part et dans la masse même du béton d'autre part.

En ce qui concerne les armatures, notre qualité actuelle de ciment ne nous permet pas encore d'obtenir une mise en traction de l'acier d'une intensité comparable à celle que peut réaliser la précontrainte mécanique. Nous poursuivons actuellement des recherches en vue d'améliorer cette action, tant par la qualité du liant que par la mise en œuvre des bétons.

La figure 33 représente les résultats obtenus avec des prismes en béton expansif au dosage de 550 kg de ciment par mètre cube mis en œuvre, armés respectivement par une, deux, trois et quatre boucles en fil de 2,7 mm de diamètre en acier dur ayant une limite élastique supérieure à 100 kg par mm², soit 10 000 kg par centimètre carré.

Quant aux autres applications, je me bornerai à en citer quelques-unes pour ne pas allonger exagérément cet exposé :

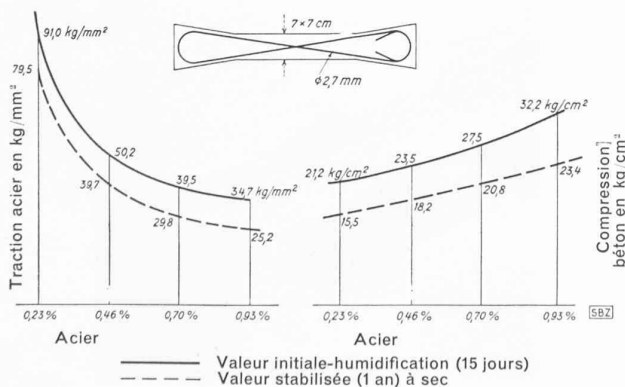


Fig. 33. — Résultats obtenus sur prismes d'essai en béton expansif.

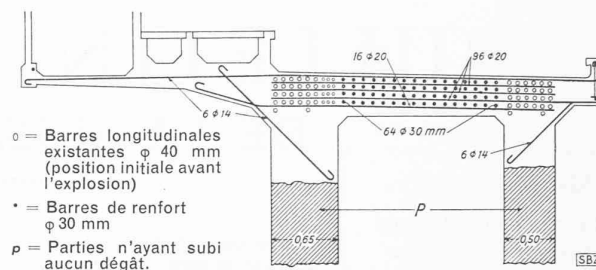


Fig. 32. — Pont de Moscou.

Barrages :

En compensant l'action du retrait, les ciments faiblement expansifs apporteront une entrave aux phénomènes de fissuration et de contraintes parasites internes, contraintes qui atteignent parfois une intensité relativement considérable.

Dans les *barrages-voûtes*, des voussoirs verticaux fortement expansifs exerceront une précontrainte favorable dans le sens des directrices.

Dans les *barrages-poids*, la réalisation des *joints* sera simplifiée et rendue plus efficace.

Pieux moulés dans le sol, massifs de fondations, tunnels, etc. :

L'expansion, surtout à la base élargie des pieux (fig. 34), exerce une action nettement favorable sur le frottement contre le terrain et, dans certains cas, sur la compacité locale propre de celui-ci.

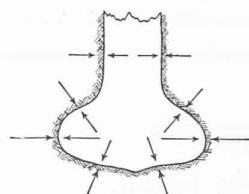


Fig. 34. — Bulbe de pieux en béton expansif.

Notons que, dans des terrains aquifères, l'humidification s'opère automatiquement.

Répétons toutefois que nos qualités actuelles de ciment ne garantissent pas l'immunité à l'action des eaux de mer et séléniteuses.

Pour des *massifs ou puits de fondation*, la poussée expansive contre le sol constitue toujours un élément favorable au point de vue de la résistance à l'enfoncement. On peut d'ailleurs n'exécuter en expansif que des éléments partiels qui agissent à la manière de vérins, comme nous l'avons vu pour les voûtes. Nous expérimentons en ce moment un procédé nouveau applicable à des puits de grande section relative.

Pour les *tunnels et galeries* de toutes sortes, les ciments expansifs peuvent être heureusement utilisés d'une part pour le clavage des voûtes et, d'autre part, pour le bourrage entre ces dernières et le terrain à perforer. Des essais sont en cours pour un important tunnel de l'Afrique du Nord.

Le *bourrage de consolidation des galeries de mines* offre des cas d'applications particulièrement intéressants.

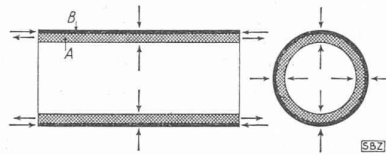
Canalisations et tuyaux :

En armant les canalisations et tuyaux suivant les génératrices et directrices, pour entraver l'expansion, on peut provoquer une *mise en compression automatique du béton dans les deux sens*, moins intense d'ailleurs, dans l'état actuel, que celle qui peut être réalisée avec la précontrainte mécanique, mais qui se révèle cependant suffisante dans certains cas.

Une *enveloppe extérieure en fibro-ciment*, utilisée comme coffrage (fig. 35), provoque également, sans aucune armature, cette compression à double étreinte.

La supériorité des ciments expansifs au point de vue de l'*impermeabilité* sera par ailleurs toujours un facteur important.

Fig. 35.
Tuyau en béton
expansif. Enveloppe
extérieure avec
fibro-ciment.



Enduits :

Les premiers essais réalisés par M. FAURY semblent donner des résultats satisfaisants ; j'attends toutefois leur observation dans le temps avant de me prononcer définitivement.

Revêtements de routes et de pistes d'avions :

Le retrait de durcissement du béton, plus encore que les variations de la température, conduit les constructeurs de routes ou de pistes bétonnées à disposer, de distance en distance, des solutions de continuité ou *joints* pour éviter des fissures de traction.

Or, ces joints, comme ceux des rails de chemins de fer, présentent de multiples inconvénients, bien connus d'ailleurs, tant pour l'usure locale des revêtements que pour la fatigue des véhicules et le confort de la circulation.

Au droit d'un joint, notamment, la pression locale unitaire sur le sol de fondation, au passage d'un essieu isolé, peut atteindre, dans certains cas, le *quadruple* de la pression qu'il subit en partie courante, ce qui explique bien des perturbations (fig. 36).

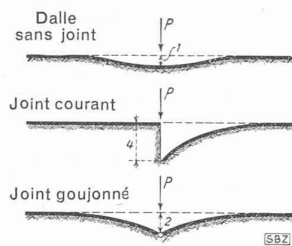


Fig. 36. — Affaissement d'un revêtement sous l'effet d'un essieu isolé.

Les « *goujons* » ou barres d'acier destinées à maintenir les extrémités de deux panneaux de revêtement consécutifs au même niveau, ne jouent en général qu'un rôle de semi-articulation, de telle sorte que la pression sur le sol, au droit des joints, atteint encore près du *double* de la pression supportée en partie courante.

Aussi, pour éviter de recourir à des joints spéciaux, est-il apparu nettement intéressant de rechercher, sinon la suppression totale des joints, du moins une réduction notable de leur nombre.

Rappelons que certaines compagnies de chemins de fer ont obtenu déjà des résultats intéressants dans ce sens en ce qui concerne les rails.

Sous l'action de la chaleur, ceux-ci tendent à se mettre en compression et résistent si leur tendance au flambage est suffisamment entravée tant dans le sens vertical que dans le sens horizontal.

Avec les revêtements en béton, le problème est ramené à l'étude du flambage, dans le seul sens vertical, de dalles reposant sur une base stable et chargées par leur propre poids, lequel exerce une action compensatrice très importante dans le sens vertical. Il convient, de plus, de tenir compte du fait que, sous l'action du soleil, il peut se produire des différences de température de l'ordre de 30 à 35° centigrades entre les faces supérieure et inférieure du béton des revêtements.

J'ai donc entrepris, en France, la réalisation d'un programme de recherches expérimentales concernant la possibilité de construire des chaussées et pistes d'avions en béton sinon sans joints, du moins avec un nombre de joints très réduit, en utilisant notamment les propriétés des ciments faiblement et fortement expansifs.

Ce programme, subventionné par le Ministère des Travaux Publics de France, comprend diverses séries d'essais, d'abord sur modèles en bois et en béton, avec chauffage électrique d'extrados pour reproduire l'action du soleil, puis ensuite sur ouvrages réels.

Ces opérations sont actuellement en cours et j'en ferai connaître prochainement les résultats dans une conférence à Paris.

La Société nationale des chemins de fer français suit ces expériences qui l'intéressent au point de vue des conditions de flambement des rails et, par suite, de l'étude des voies sans joints.

Applications mixtes :

Il existe, dans la pratique, de nombreux cas où les *ciments expansifs* pourront être utilisés en même temps que la *précontrainte mécanique*.

Dans le cas de *conduites pour fortes pressions*, par exemple, la précontrainte longitudinale nécessaire est nettement plus faible que la contrainte diamétrale à réaliser.

On peut alors exécuter les noyaux en béton expansif, quelques barres longitudinales suffisant pour mettre le béton en précompression dans le sens des génératrices. Il suffit alors de compléter la double étreinte en disposant des frettes extérieures mises mécaniquement en traction par les procédés ordinaires. La précontrainte longitudinale mécanique est ainsi supprimée. Des essais sont actuellement en cours à ce sujet en France et en Afrique du Nord.

Dans le cas de *poutres de planchers ou de ponts*, le béton expansif peut être utilisé pour réaliser une compression transversale grâce aux étriers et ligatures qui s'opposent alors à l'expansion, tandis que les barres longitudinales sont tendues mécaniquement.

On pourrait citer encore d'autres exemples du même genre, mais le temps nécessaire nous manque pour cela.

Calcul de l'action de l'expansion.

Considérons le cas élémentaire le plus simple, c'est-à-dire celui de deux prismes de faible épaisseur solidarisés à leurs extrémités et obligés, en conséquence, de conserver une égale longueur lorsque l'un d'eux tend à s'allonger sous l'action de la force expansive (fig. 37).

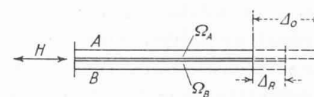


Fig. 37.

Désignons par :

Δ_0 : l'allongement que subirait le prisme expansif A, s'il était libéré de toute liaison avec le prisme ordinaire B ;

Δ_R : l'allongement réel que subiront ensemble les deux prismes A et B ;

Ω_a et Ω_b : les sections respectives de ces prismes ;

E_b : le coefficient d'élasticité du béton du prisme B ;

H : l'effort de liaison qu'engendre l'expansion entre les deux éléments.

R : la compression du prisme A sous l'action de cet effort H .

Nous avons les relations :

$$\Delta_R = \frac{H}{\Omega_b \cdot E_b} \text{ et } R = \frac{H}{\Omega_a}$$

d'où nous tirons le rapport :

$$\frac{\Delta_R}{R} = \frac{\Omega_a}{\Omega_b \cdot E_b} \text{ qui constitue la caractéristique du système.}$$

Si le prisme expansif A fonctionnait élastiquement, le rapport $\frac{\Delta_R}{R}$ serait une constante égale à $\frac{1}{E_a}$, E_a étant alors le coefficient d'élasticité du prisme A .

Mais, par suite des déformations plastiques du béton au cours de son expansion entravée, ce rapport est une variable dont la courbe représentative constitue la *courbe expansive dynamique*, qui doit être déterminée expérimentalement pour chaque béton, ce qui est facilement réalisable avec l'appareil Faury.

Supposons cette courbe connue pour un béton déterminé (fig. 38), l'allongement Δ_R étant porté en ordonnées et la pression correspondante R en abscisses.

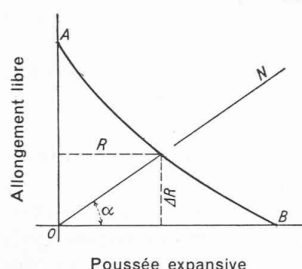


Fig. 38. — Courbe expansive dynamique.

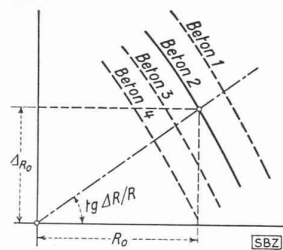


Fig. 39. — Courbes expansives dynamiques des divers bétons.

En traçant la sécante O, N , dont l'angle avec l'horizontale a pour tangente le rapport $\frac{\Delta}{R}$, on obtient les *valeurs réelles* de Δ_R et R pour le béton considéré.

S'il s'agit de réaliser (fig. 39), pour l'un ou l'autre de ces termes, une valeur numérique Δ_{R_0} ou R_0 déterminée, on fait alors usage d'une famille de courbes dont chacune est propre à un dosage particulier, ce qui permet de choisir la qualité de béton à employer. Dans notre figure sont représentées les courbes expansives dynamiques relatives à quatre bétons différents numérotés de 1 à 4.

Il va sans dire que, lorsque les deux prismes A et B que nous avons envisagés, ont une épaisseur non négligeable, le calcul de l'effet d'expansion doit tenir compte de leurs déformations par flexion. S'ils sont solidarisés sur toute leur longueur, leurs rayons de courbure doivent être, de plus, égaux.

Mais, quel que soit le cas, on est toujours ramené à la détermination de la caractéristique $\Delta_R : R$ du système envisagé.

Conclusions.

D'une manière générale, et à côté de qualités précieuses, tous les ciments sont affectés par deux principaux défauts qui sont :

- leur faible résistance à la traction,
- leur retrait de durcissement à l'air.

Le premier de ces défauts s'est quelque peu modifié avec les ciments à hautes caractéristiques réalisés au cours de ces dernières années ; mais, si leur résistance à la traction s'est élevée en valeur absolue, elle l'a fait toutefois dans une pro-

portion nettement moindre que celle à la compression, de telle sorte que la *fragilité* des ciments s'en est accrue, réduisant de la sorte sensiblement l'intérêt du progrès réalisé, au point de vue de nos applications pratiques.

Quant au retrait de durcissement à l'air, agent générateur de tant d'efforts parasites et de fissures, on a pu réduire quelque peu son intensité et ses effets par divers procédés, sans parvenir cependant à le faire disparaître complètement.

Les ciments expansifs ne le suppriment pas en fait ; mais ils le *compensent* en provoquant un gonflement initial égal ou supérieur à l'intensité du retrait dans le temps.

Si je fus, à ma connaissance du moins, le premier à envisager la possibilité de *réaliser automatiquement la triple étreinte du béton en utilisant la puissance expansive de ciments spéciaux*, mon idée serait demeurée stérile si des chimistes éminents, auxquels je dois rendre hommage, ne s'étaient pas intéressés à ma conception et n'étaient parvenus à créer ces ciments.

Obtenir un ciment qui gonfle en durcissant était une chose déjà connue, mais qui ne constituait alors, le plus souvent, qu'un vulgaire accident de fabrication.

Comme le feu, si ravageur à l'état libre et pourtant si bien-faisant lorsqu'il est dompté, l'expansion d'un ciment ne pouvait être utilisée qu'après avoir été rendue à la fois *réglable* et *stable*. De plus, cette stabilité ne pouvait être affirmée qu'après plusieurs années d'observations ; c'est pourquoi j'ai tenu à procéder à de nombreux essais avant de recourir à des applications pratiques, bien que ma première communication au Congrès international des ponts et charpentes, qui date de 1936, soit déjà vieille de plus de dix ans.

Par leurs qualités d'imperméabilité et de compacité, favorables à la conservation des armatures et à la résistance aux agents extérieurs, les ciments expansifs semblent devoir se substituer peu à peu à d'autres ciments dans bien des applications. Les *nuances faiblement expansives*, destinées surtout à compenser le retrait, s'appliqueront particulièrement à des travaux courants.

Les *nuances fortement gonflantes* seront, par contre, réservées aux cas spéciaux qui utilisent, en l'entravant, la puissance expansive de ces liants.

Mais l'idée n'en est encore qu'à ses débuts pratiques et l'on doit s'attendre à la voir se développer notablement dans les années à venir.

À côté des premiers ciments expansifs qui ont ouvert la voie, d'autres naîtront encore. D'où qu'ils viennent, je me réjouirai de leurs progrès.

* * *

En terminant, jetons un regard d'ensemble pour tenter de situer nos tendances actuelles dans l'histoire de la construction et, plus spécialement, du béton armé.

Est-il possible d'affirmer que nos conceptions modernes relatives à la précontrainte du béton, qu'elle soit obtenue mécaniquement ou par utilisation des ciments expansifs, représentent au moins le début de ce que seront les formes *définitives* du béton armé dans l'avenir ?

Quelle que puisse être à ce sujet l'opinion, d'ailleurs défendable, de certains techniciens, je ne possède pas, personnellement, cette certitude.

Comme je l'ai déjà exprimé dans une autre enceinte, je crois que ces conceptions constitueront un stade dans l'histoire du béton armé, stade peut-être très brillant par ses réalisations, mais cependant stade intermédiaire.

Le béton que nous connaissons n'est pas un matériau riche comme l'acier. Quoique artificiel, c'est encore un matériau pauvre, que sa résistance hétérogène aux différentes sollicitations et sa fragilité vouent à une utilisation partielle s'il n'est pas secouru par d'autres éléments.

Les armatures, dont l'apport a constitué le premier stade du béton armé, ont permis de l'utiliser depuis plus d'un demi-siècle dans les domaines les plus divers. Quel que puisse être notre désir légitime de lui substituer de nouvelles méthodes, on doit reconnaître que celles de ses applications qui ont été rationnellement conduites à tous égards, ont justifié les espérances fondées sur elles.

L'expérience du temps n'a pas, en effet, confirmé certaines craintes excessives concernant le rôle de la fissuration et des effets dynamiques. Aussi, à mon avis, *le béton armé classique, au besoin perfectionné, doit survivre encore parallèlement à nos méthodes nouvelles.*

Ces méthodes modernes, qui ont ressuscité la conception de DOEHRING, en l'amplifiant et en la complétant, ont libéré le béton armé de la fissuration, tout en permettant de l'utiliser de la façon la plus complète.

C'est à l'expérience et au temps seuls qu'il appartiendra de leur assigner leur place exacte dans l'avenir. Nous sommes trop près d'elles pour pouvoir en juger définitivement nous-mêmes.

Quelle serait notamment l'importance des économies finales qui seront réalisées ? Il est difficile de le préciser aujourd'hui. En effet, en ramenant, comme on le fait parfois, tout à la période actuelle, qui est exceptionnelle et anormale, on risque de créer une psychose qui consisterait à attribuer rigoureusement à l'avenir les difficultés toutes momentanées de l'heure présente.

* * *

Quoiqu'il en soit, nos conceptions anciennes et modernes ne peuvent avoir d'autre but que de parer aux déficiences du matériau incomplet qu'est le béton actuel. Nous le lions, nous le ligaturons, nous le sanglons comme un organisme malade.

Qui sait, et c'est là que j'entrevois l'avenir et le stade futur de son histoire, si nos successeurs ne parviendront pas à le guérir tout simplement de ses infirmités.

Lorsqu'on sera parvenu à réaliser des liants, je ne dis plus des ciments qui, tout en restant économiques, seront libérés des défauts des matériaux pierreux, le problème ne sera sans doute pas encore complètement résolu, mais un grand pas sera fait dans cette voie.

L'industrie suisse occupe incontestablement une place d'honneur dans la fabrication des ciments, tant par la régularité que par les hautes caractéristiques de ses produits.

C'est d'ailleurs avec un ciment suisse, le HOLDERBANK, que j'ai réalisé en France mes premiers travaux à durcissement rapide.

Mais, malgré cette situation privilégiée, Messieurs les cimentiers, votre œuvre est loin d'être achevée. Vos études doivent encore s'intensifier vers la recherche de ciments qui, moins fragiles, posséderont néanmoins de hautes qualités de durcissement rapide et d'énergie expansive, sans être handicapés par des prix de revient prohibitifs.

Messieurs, je salue à l'avance le chimiste suisse qui nous apportera, je veux l'espérer, le ciment complet de l'avenir.

Calcul de blindages circulaires pour galeries sous pression

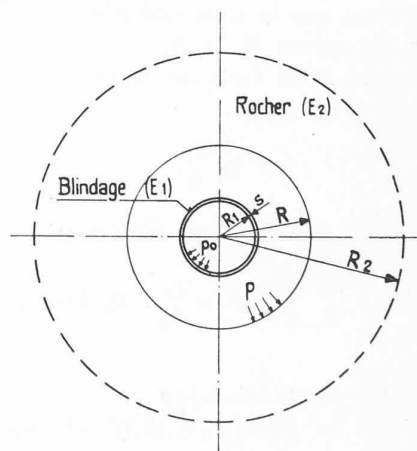
par J. TRÜB, ingénieur.

Le calcul de blindages circulaires pour des galeries sous pression étant d'actualité, l'auteur pense contribuer à sa solution en publiant les notes de calcul suivantes.

A. Calcul d'un blindage sous pression d'eau intérieure.

Les calculs qui suivent s'appliquent à une construction strictement homogène dans tous les sens, ce qui n'est possible que si la galerie se trouve à une distance suffisante de la surface du terrain et si ce dernier est homogène. Etant donné la faible épaisseur de la couche de béton d'enrobage entre blindage et rocher, nous admettons que ce béton présente les mêmes qualités que le rocher. Nous faisons abstraction de la résistance à la traction du rocher.

En appliquant les conditions d'égalité des déformations, nous trouverons comme résultat l'économie d'épaisseur de la tôle du blindage en fonction des qualités du rocher. Nous appelons système de base une conduite forcée de même diamètre, à l'air libre, calculée pour la même pression intérieure et introduisons les appellations suivantes :



- R_1 = diamètre du blindage.
- R_2 = rayon de la zone intéressée du rocher.
- R = rayon variable d'un cylindre coaxial à la galerie.
- s = épaisseur du blindage dans rocher.
- s_0 = épaisseur du blindage nu (système de base).
- e = $s_0 - s$ = économie d'épaisseur = différence d'épaisseur entre le blindage et une conduite à l'air libre.
- E_1 = module d'élasticité du métal.
- E_2 = module d'élasticité du rocher.
- p_0 = pression de l'eau à l'intérieur du blindage.