

Zeitschrift: Bulletin technique de la Suisse romande
Band: 73 (1947)
Heft: 16

Artikel: Les ciments expansifs et l'autocontrainte du béton
Autor: Lossier, Henry
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-55144>

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: 08.07.2025

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. ODIER, 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*, par HENRY LOSSIER. — LES CONGRÈS : *Centenaire de l'« Institution of Mechanical Engineers »*, Londres 8-13 juin 1947. — DIVERS : *Concours de la Fondation Denzler*. — BIBLIOGRAPHIE. — SERVICE DE PLACEMENT.

Les ciments expansifs et l'autocontrainte du béton

par HENRY LOSSIER¹

On dit couramment qu'il n'y a rien de nouveau sous le soleil. Cette affirmation paraît exagérée en ce qui concerne les conceptions humaines.

Et pourtant, lorsqu'on étudie de près certaines de nos innovations, on constate que, bien souvent, l'idée maîtresse qui guida chaque inventeur avait été envisagée déjà, sous une forme plus ou moins parfaite, par un ou plusieurs de ses devanciers, dont le manque de moyens matériels ou l'absence d'une ambiance favorable avait, dans bien des cas, stérilisé les recherches.

L'étude rétrospective des inventions engendre d'une part un sentiment de compassion pour tant d'efforts perdus pour leurs auteurs et, d'autre part, une leçon de modestie qui vise même les plus grands de nos contemporains.

Lorsqu'au cours de la guerre 1914-18, les alliés réalisèrent un programme relativement important de chalands et de remorqueurs en béton armé, l'idée parut à certains d'un modernisme excessif. Et cependant, le premier ouvrage en béton armé proprement dit que l'on puisse citer, n'est-il pas un bateau exposé par LAMBOT en 1855, c'est-à-dire près de soixante ans auparavant.

Aujourd'hui la mode, qui se lance et sévit parfois dans le domaine de la Science aussi bien que dans celui de la fantaisie, s'attache aux problèmes des sollicitations multiples des matériaux de construction et, en particulier, à leur triple étreinte, irrégulière ou hydrostatique. Et l'on entend parfois

poser la question de savoir quel est, en définitive, l'inventeur de cette sollicitation complète. La réponse est évidente et ne met en jeu aucune rivalité de personnes, car cet inventeur n'est autre que Dieu lui-même.

La triple étreinte règne en effet dans la nature entière. Les astres, les galets de la mer, en un mot tous les éléments immergés ou enterrés, sont soumis à cette action.

Les expériences effectuées depuis plus d'un demi-siècle sur des matériaux fragiles tels que le cristal, la fonte de fer, les produits céramiques et le béton, ont illustré les remarquables propriétés de résistance et de ductilité que leur confère la triple étreinte convergente. Une sphère qui serait plongée dans une mer de profondeur infinie diminuerait sans doute considérablement de volume, mais ne se romprait sous aucune pression, à condition qu'elle ne comporte aucun vide.

Et la question des sollicitations naturelles nous conduit normalement à celle des *précontraintes artificielles*, c'est-à-dire à l'art d'imposer, à des ouvrages, des efforts de sens opposé à ceux qu'ils supportent du fait de leur utilisation normale. Dans ce domaine, ce n'est plus à Dieu, mais plus simplement aux hommes que revient le mérite de ces conceptions.

Le pêcheur ancestral qui enroulait avec force une liane autour de son roseau pour l'empêcher de se fendre, faisait déjà de la précontrainte. Le tonnelier qui cerce ses tonneaux, le charron qui pose à chaud le bandage métallique d'une roue en bois, l'industriel qui frette un tube de canon, en font également.

Les anciens constructeurs de ponts en bois qui, notamment en Suisse, ont souvent réalisé des tours de force remarquables, mettaient parfois certains éléments en compression initiale pour éviter du jeu dans les assemblages. Et le premier constructeur qui eut l'idée de placer dans les voûtes en maçonnerie des chaînages transversaux mis en traction à l'aide de boulons, réalisa déjà un effet de triple étreinte artificielle.

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.

Plus près de nous, avec un recul de près d'un demi-siècle, les noms de RITTER, RABUT, CONSIDERE et d'autres s'attachent, avec des conceptions diverses, au problème du réglage forcé du fonctionnement de certains ouvrages par la mise en action d'efforts initiaux provoqués artificiellement.

Fait curieux et digne de remarque, l'idée de la *précontrainte mécanique des agglomérés*, dont on s'occupe beaucoup depuis quelques années, a précédé de plusieurs années les premières réalisations d'HENNEBIQUE, qui marquent le début de l'expansion pratique du béton armé.

Il y a cinquante-huit ans, en effet, en 1888, qu'un constructeur berlinois, nommé DOEHRING, prit un brevet pour la fabrication d'éléments de planchers ignifuges. Ces éléments, en mortier, étaient armés par des fils métalliques soumis, d'après l'expression même de DOEHRING, à une *très forte traction* réalisée avant leur enrobage, puis maintenue pendant le durcissement du liant. La mise en traction des fils était réalisée à l'aide de vis et de poulies de renvoi, comme le représente, en principe, la *figure 1*. Les fils étaient ensuite coupés et les éléments démoulés.

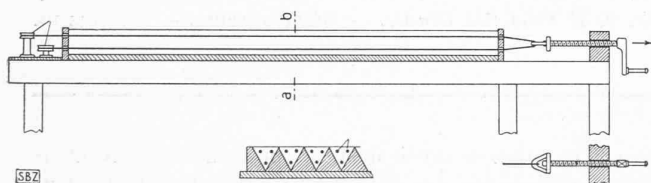


Fig. 1. — Procédé de précontrainte de Döring (1888).

Environ trente-cinq ans plus tard, vers 1923, le Viennois EMPERGER concevait et réalisait des conduites d'eau pour fortes pressions, en frettant des tuyaux ou noyaux exécutés à l'avance avec des barres mises en précontrainte par des procédés mécaniques ou thermiques. Il supprimait les frottements des frettes sur le béton en intercalant des éléments de fer rond, comme l'indique schématiquement la *figure 2*¹.

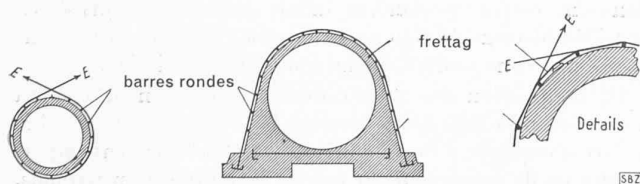


Fig. 2. — Tuyaux avec armatures précontraintes selon système Emperger (1923).

Arrivé à ce point de mon exposé, et laissant de côté quelques conceptions d'importance limitée, je devrais, chronologiquement, vous citer l'œuvre considérable de M. FREYSSINET, auquel je suis heureux de rendre ici un légitime hommage. Mais, cette œuvre vous étant connue, je ne puis mieux faire que m'en rapporter aux propres exposés de son illustre auteur.

M. COYNE, le réalisateur de plusieurs de nos plus grands barrages français, eut l'idée d'améliorer la stabilité de certains

¹ Il utilisait pour les frettes de l'acier ordinaire dont il élevait la limite élastique par écrouissage. Toutefois, dans une note parue en 1923, dans le *Beton und Eisen*, il préconisait l'emploi d'aciers durs, travaillant à des taux relativement très élevés et dont la résistance semble devoir être de l'ordre de 120 kg par mm².

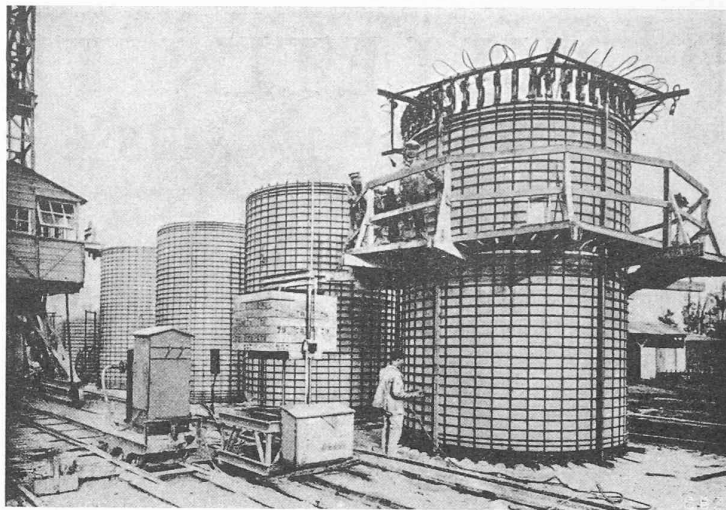


Fig. 3. — Noyaux moulés à l'avance et soumis à une double précontrainte selon le système réalisé par M. Chalos pour le siphon de Chatou, sous la Seine.

d'entre eux à l'aide de tirants métalliques ancrés dans le rocher et soumis, par des vérins hydrauliques, à des tractions de l'ordre de 80 kg par mm².

Dans le domaine des *canalisations*, je citerai l'intéressante réalisation du professeur CHALOS, relative à un siphon sous la Seine à Chatou, près de Paris, en utilisant un procédé spécial de double précontrainte imaginé par lui.

Comme le représente la *figure 3*, on utilise des noyaux moulés à l'avance, comme le faisait EMPERGER¹.

Citons encore, cette fois dans le domaine des *ponts*, le type de précontrainte ou plutôt de « postcontrainte » préconisé par DISCHINGER, qui utilise des câbles de ponts suspendus disposés à l'intérieur des parties creuses des ouvrages, câbles qui transmettent leurs efforts par des bielles articulées destinées à supprimer tous efforts de frottement. Ces câbles sont mis en traction à l'aide de vérins spéciaux. Comme tous ces dispositifs sont accessibles, on peut *procéder en tous temps à des réglages de manière à compenser, à la demande, l'action défavorable du retrait et du fluage du béton et de l'acier*.

Le pont d'Aue a été construit avec ce procédé. Ce pont comporte une travée en Cantilever de 69 m de portée.

Dans les deux cas, les sections de béton sont soumises à une compression *uniforme*, sans flexion, sous charge permanente, et ne subissent jamais d'efforts de traction sous l'action des surcharges.

Mentionnons enfin le système d'armatures autoprécontraintes inventé par M. CHALOS, professeur à l'Ecole des ponts et chaussées de France, d'un fonctionnement analogue à celui des freins de bicyclettes².

¹ La précontrainte longitudinale est réalisée par des génératrices en fer plat, qualité acier doux, mises en traction à l'aide de vérins.

La précontrainte diamétrale est obtenue par des frettes circulaires en acier dur qui sont mises en traction non par des tractions tangentielles comme le font certains, mais au contraire par des tractions *radiales*, ce qui supprime toute sollicitation au glissement et, par suite, tous efforts de frottement parasites.

La pression des frettes extérieures empêche tout déplacement des génératrices en mettant simplement en jeu leur frottement sur le béton, ce qui permet de supprimer tout ancrage aux abouts.

Un matériel très simple assurait un contrôle rigoureux de toutes les opérations.

² Chaque barre est constituée par un tube métallique en fil tissé, mis en traction sur un noyau flexible, les deux éléments étant alors soudés sous charge à leurs extrémités. Ces armatures, qui peuvent être enroulées pour leur transport, sont noyées dans le béton à précontraindre puis, lorsque ce dernier a subi un durcissement suffisant, sont libérées de leur noyau par coupure aux extrémités. Aucun crochet ni ancrage n'est nécessaire en raison de la forte adhérence du béton sur le tube en fil tissé. La *figure 4* montre une armature de ce type.

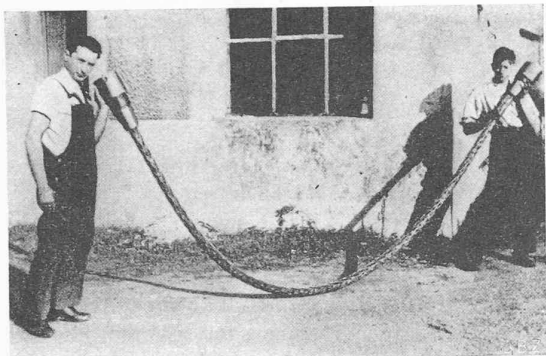


Fig. 4. — Armature autoprécontrainte de M. Chalos.

J'applique personnellement un mode de précontrainte mécanique très simple qui consiste à constituer chaque poutre par deux tronçons articulés réunis par l'armature.

En redressant les tronçons à l'aide d'un vérin, les armatures sont mises en précontrainte. Une clavette de calage stabilise alors le système et il ne reste qu'à enrober les barres dans leur alvéole. La figure 5 montre une des phases de l'opération, qui ne nécessite ni ancrages spéciaux, ni action directe sur les armatures.

La mise en charge des barres ne dépasse guère une minute par poutre.

Ce rappel préliminaire rapide nous amène au cœur même de mon sujet, qui est l'autocontrainte du béton.

* * *

Après avoir, dès 1924, tenté d'utiliser les procédés d'EMPERGER pour obtenir la double et la triple étreinte du béton, j'envisageai, dès 1925, une méthode entièrement différente. Tandis que les divers procédés utilisés depuis 1888 consistaient à comprimer le béton par des contraintes agissant de l'extérieur, j'envisageai au contraire de provoquer le gonflement du béton lui-même, dans toutes les directions, puis d'utiliser sa force expansive soit pour tendre des armatures, soit pour agir comme des vérins contre des maçonneries ou des terrains, soit de toute autre façon.

Ai-je eu des précurseurs dans cette conception ? C'est très possible ; mais je l'ignore.

Toutefois, l'idée en elle-même ne pouvait avoir d'intérêt pratique qu'autant que je disposerais de ciments subissant non pas seulement un retrait de durcissement comme les liants courants, mais au contraire une expansion nettement supérieure à ce retrait. Je m'orientai donc nettement vers les ciments expansifs.

Après avoir consulté notre maître Henry LE CHATELIER, je m'adressai à plusieurs firmes françaises dont l'une, les Etablissements POLIET et CHAUSSON, voulut bien s'intéresser à la question sur de nouvelles bases.

Les noms de ses collaborateurs HENDRICKS et PERRÉ, puis le professeur LAFUMA, sont liés à la mise au point de la fabrication des ciments expansifs actuels.

Composition des ciments expansifs.

Ces ciments sont obtenus, en principe, par le mélange de trois éléments connus et stables par eux-mêmes :

1. Un ciment Portland artificiel qui constitue la base.
2. Un ciment sulfo-alumineux qui joue le rôle de facteur expansif.

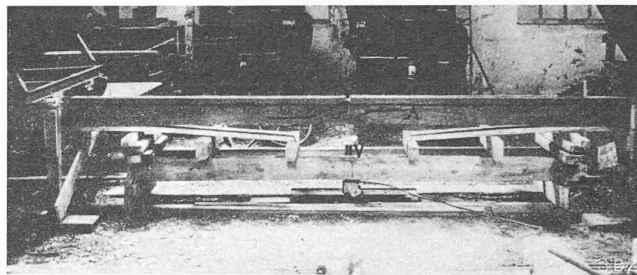


Fig. 5. — Mise en précontrainte d'une poutre selon système de M. Lossier.

3. Un élément stabilisateur dont l'entrée en action, volontairement retardée, arrête l'expansion en absorbant le principal réactif, c'est-à-dire le sulfate de chaux. Cet élément stabilisateur est en général constitué par du laitier de hauts-fourneaux.

Le dosage judicieux des trois constituants, la base, le facteur expansif et l'élément stabilisateur, permet de régler l'expansion à la fois en intensité et en durée, avec une précision remarquable en pareille matière.

D'ailleurs, comme nous le verrons plus loin à l'occasion des applications pratiques, on dispose d'un moyen de réglage direct en exécution, à la fois simple et efficace.

Je laisse à dessein de côté les questions spéciales des détails de fabrication de ces ciments, qui sont du domaine exclusif des fabricants et des chimistes.

Quant au mécanisme de l'expansion, je vous renvoie à la théorie de M. PERRÉ.

Propriétés des ciments expansifs.

La caractéristique principale de ces liants est leur propriété d'acquiescer un gonflement stable en milieu constant, gonflement qui est pratiquement réglable en intensité et en durée.

L'intensité de l'expansion peut atteindre, en pâte pure, jusqu'à 50 mm par mètre, soit le vingtième de la longueur initiale.

Sa durée peut être réglée entre un minimum de vingt-quatre heures et un maximum de trente jours environ.

Pratiquement, pour simplifier la fabrication, nous réalisons deux qualités principales qui sont les suivantes :

- a) ciment faiblement expansif dénommé « sans retrait », c'est-à-dire dont l'expansion initiale de 3 à 4 mm par mètre en pâte pure est sensiblement égale au retrait dans le temps, qu'elle compense ;
- b) ciment expansif proprement dit, dont l'expansion en pâte pure est en général de l'ordre de 10 à 25 mm par mètre.

La durée de l'expansion, c'est-à-dire le temps pendant lequel elle croît progressivement en milieu humide avant de se stabiliser en milieu constant, est réglée en général entre dix et quinze jours pour des éprouvettes en pâte pure conservées dans l'eau.

Une plus grande rapidité de gonflement aurait l'inconvénient de mettre en action l'énergie expansive avant que le ciment possède une résistance suffisante.

Un gonflement trop lent constituerait par ailleurs une sujétion d'exécution car, pendant sa durée, les masses de béton doivent être maintenues dans un état d'humidité suffisant pour provoquer les réactions expansives.

Quant au processus de l'expansion, il est représenté par les figures 6 et 7.

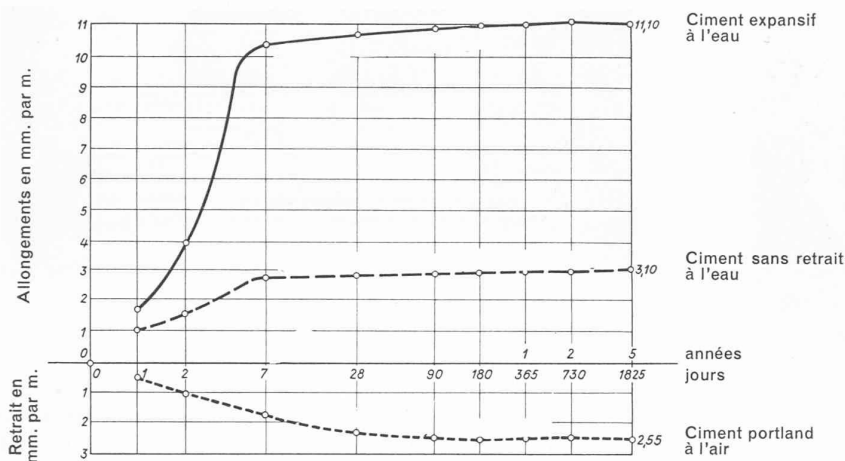


Fig. 6. — Allongements et retrait en fonction du temps et du mode de conservation.

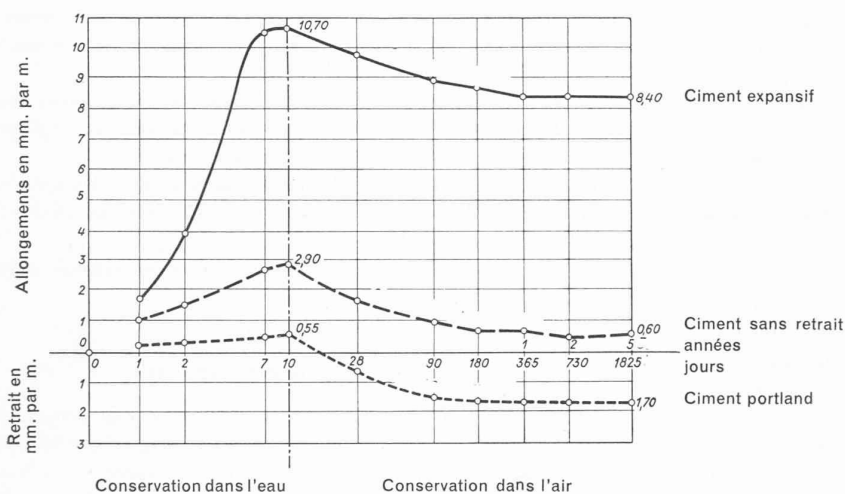


Fig. 7. — Allongements et retrait de divers ciments conservés 10 jours à l'eau puis à l'air.

La figure 6 se rapporte à la conservation dans l'eau, les allongements étant portés en ordonnées et le temps en abscisses logarithmiques. Les courbes d'expansion sont représentées en traits pleins pour un expansif, en traits mixtes pour un sans-retrait et en pointillé pour un ciment Portland ordinaire conservé à l'air.

On constate que les ciments sans retrait et expansifs envisagés conservés dans l'eau subissent des gonflements respectifs de 3 et 11 mm par mètre, qui se stabilisent en dix jours environ, l'observation étant répartie sur cinq années. A titre comparatif, nous avons représenté la courbe relative à un Portland conservé à l'air et qui subit un retrait de 2,5 mm pendant la même période.

La figure 7 montre que, si les éprouvettes, après leur séjour de huit jours dans l'eau, sont ensuite conservées à l'air sec, elles subissent alors leur retrait normal qui vient en déduction de leur expansion. C'est ainsi que le gonflement du ciment dénommé « sans retrait » s'annule pratiquement, les deux phénomènes s'étant compensés, tandis que l'expansif stabilise son allongement entre 8 et 9 mm par mètre.

L'intensité de l'expansion, pour les bétons, diminue naturellement avec leur dosage en ciment expansif.

Si l'on désigne par l'unité l'expansion en pâte pure, on obtient couramment des expansions de l'ordre de :

0,90	pour du béton à 1000-kg de ciment
0,70	» » 800 » »
0,45	» » 600 » »
0,20	» » 400 » »
0,10	» » 250 » »

Ces proportions varient d'ailleurs avec la qualité des ciments.

La figure 8 montre l'allure de la courbe qui représente ces relations.

Lorsque le béton subit son expansion sous contrainte, il se produit des déformations plastiques qui réduisent l'intensité du phénomène, comme nous le verrons plus loin.

La figure 9 dans laquelle les résistances à la compression sur mortier normal sont portées en ordonnées et le temps en abscisses logarithmiques, montrent que les ciments expansifs subissent, par rapport au Portland, une certaine diminution au cours du gonflement, après quoi leur résistance égale, puis surclasse définitivement celle du ciment de base.

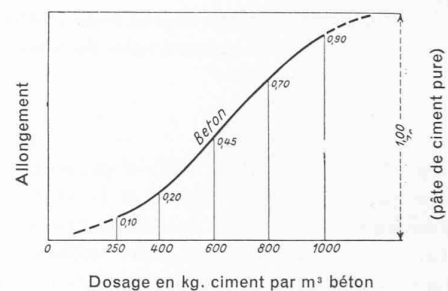


Fig. 8. — Allongement relatif d'un béton en fonction de son dosage.

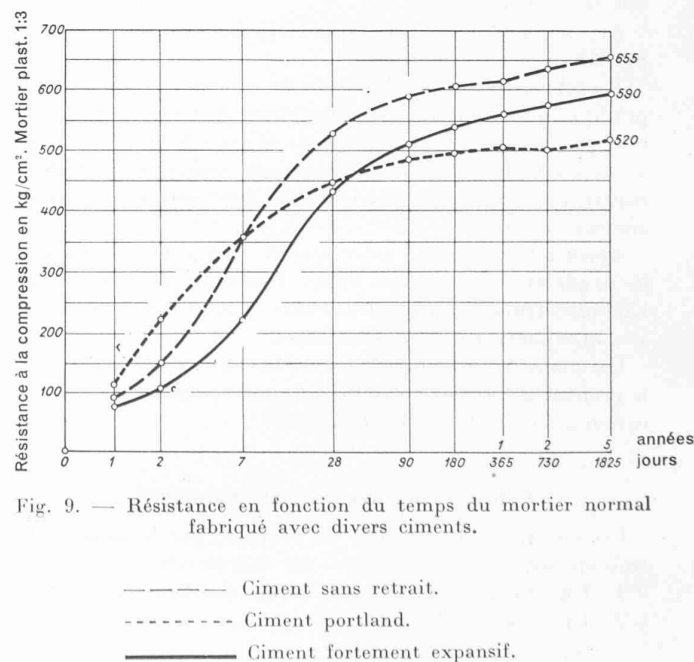


Fig. 9. — Résistance en fonction du temps du mortier normal fabriqué avec divers ciments.

Quant à l'imperméabilité des expansifs, elle est, à dosage égal, nettement supérieure à celle des autres ciments, ce qui constitue un avantage important même pour des constructions courantes, notamment en ce qui concerne la protection des armatures et la résistance aux agents atmosphériques.

Deux précautions sont toutefois à observer dans les applications :

- en premier lieu, les expansifs sont plus sensibles à l'éventement que les artificiels ordinaires ; c'est pourquoi ils sont livrés normalement dans des sacs comportant une couche de papier goudronné ;
- en second lieu, étant surdosés en $S.O^3$, ils sont également plus sensibles à la présence accidentelle de sulfates. Aussi les sables et graviers utilisés pour la confection des mortiers et bétons ne doivent-ils pas en contenir.

Enfin, les expansifs actuels ne sont pas encore classés officiellement comme résistant à l'action des eaux de mer ou sulfatées.

Une forte élévation de la température au début de l'expansion, soit par la vapeur, soit par de l'eau chauffée, tend à réduire l'intensité du phénomène tout en majorant les résistances initiales.

L'action du froid est relativement moins sensible.

Premières expériences sur les ciments expansifs.

Nos toutes premières expériences furent surtout des *essais de principe ou de démonstration*. Nous citerons les suivantes :

a) Deux prismes mesurant 15 cm de largeur et 20 cm d'épaisseur, placés dos à dos, furent armés dissymétriquement comme le représente la figure 10.

L'armature extérieure comportait trois barres de 22 mm et l'armature intérieure trois barres de 6 mm seulement.

Sous l'action de la force expansive du béton utilisé pour leur exécution, ces deux prismes s'incurvèrent vers l'extérieur (fig. 10). Leur écartement, égal au double de la flèche horizontale de chacun d'eux, atteignait 15 mm environ après une quinzaine de jours. Exposés à l'air extérieur et aux intempéries depuis plus de quatre ans, ces prismes n'ont subi que des variations d'écartement de l'ordre de 15 %.

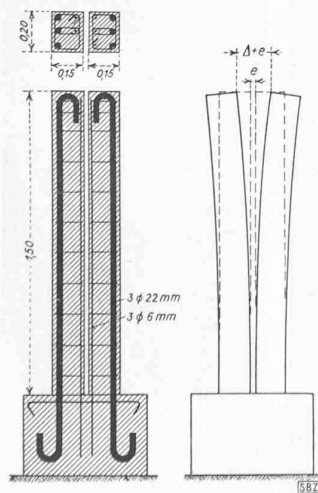


Fig. 10. — Prismes d'essais placés dos à dos, dissymétriquement armés, avant et après expansion du béton.

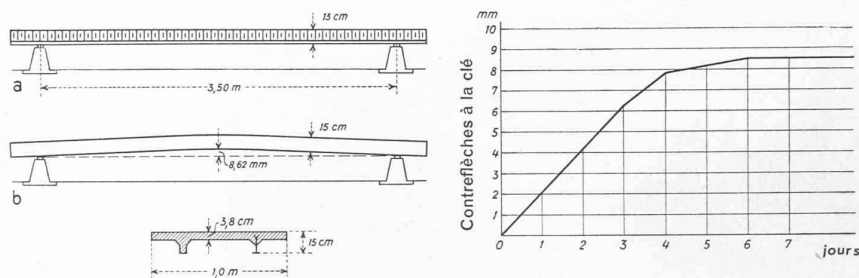


Fig. 11. — Essais d'un élément de plancher comportant deux poutrelles métalliques Christin réunies par un hourdis en béton expansif.

b) Une voûte à échelle réduite mesurant 0m 04 d'épaisseur, 1,50 m de portée et 0,075 m de flèche, c'est-à-dire surbaissée au $L/20$, fut exécutée en ciment moyennement expansif.

Elle se décintra automatiquement dès le premier jour et présentait, à huit jours, une contreflèche stabilisée de 19 mm à la clef, sans aucune trace de fissure.

Cette contreflèche représente le quart de sa flèche initiale. S'il s'agissait d'une voûte de 100m de portée et de même forme, par exemple, la contreflèche automatique serait voisine de 1,25 m.

Inutile de dire qu'il ne s'agit là que d'une expérience de démonstration et que nous agissons avec beaucoup plus de modération dans la pratique courante.

c) Un élément de plancher de 3,50 m de portée comportant deux poutrelles métalliques Christin réunies par un hourdis en béton expansif (fig. 11).

Sous le seul jeu de l'expansion du hourdis, le plancher se décintra automatiquement le premier jour en prenant une contreflèche égale à 2 mm au milieu de la portée. Cette contreflèche dépassa 8 mm après cinq jours d'humidification. Lors des essais de chargement, il fallut une surcharge de 1040 kg par mètre carré pour ramener l'intrados des poutrelles à l'horizontale.

Appareils de contrôle des ciments expansifs.

En plus des appareils courants relatifs à tous les ciments, nous en utilisons deux types particuliers :

— le premier, imaginé par M. FAURY, est destiné à la mesure de l'énergie expansive.

Il comporte (fig. 12) une base rigide A, un montant vertical B et une bielle horizontale E articulée sur le montant et munie d'un dynamomètre G à son autre extrémité.

Les prismes à essayer, qui mesurent 10×10 cm de section et 1 m de longueur, sont placés dans une caisse étanche C qui peut être remplie d'eau ; ils sont munis haut et bas d'arti-

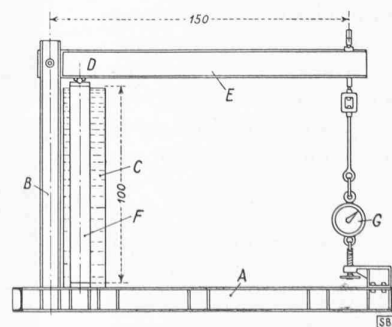


Fig. 12. — Appareil de Faury.

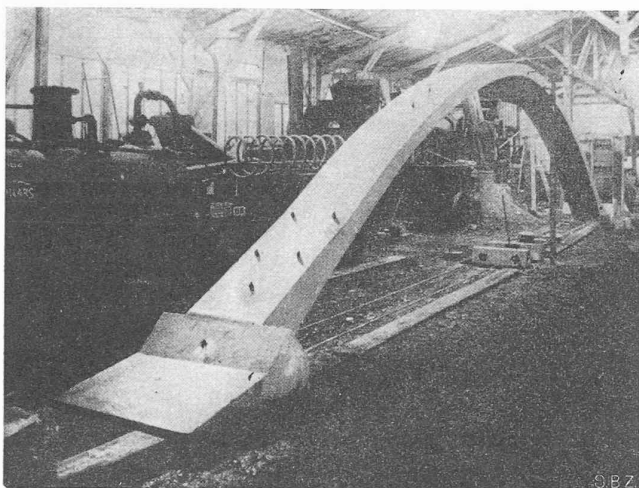


Fig. 13. — Modèle de voûte de 12 m. de portée.
Les deux culées sont réunies par des tendeurs à longueur variable
avec dynamomètres et appareil de mesure.

culations pour centrer les efforts. Deux fleximètres *D* permettent de mesurer les allongements des éprouvettes.

Cet appareil permet de déterminer la force expansive sous pressions et allongements constants ou variables, de même que le coefficient d'élasticité des bétons sous des sollicitations de longue ou de courte durée. Nous l'utilisons notamment pour établir la courbe expansive dynamique dont il sera question au sujet des calculs.

— Le second appareil utilisé (fig. 13) sert au réglage des voûtes et des bow-strings.

Il comporte une culée fixe et l'autre mobile. Ces deux culées sont réunies par des tendeurs à longueur variable avec dynamomètres et appareils de mesure. On voit, sur la figure, un modèle de voûte de 12 m de portée, en cours d'expérience. En maintenant invariable l'écartement des culées, on réalise le cas d'arcs sur appuis fixes; en le faisant varier, on se rapporte aux divers cas d'arcs à tendeurs, à appuis élastiques ou plastiques ou à travées multiples.

Applications des ciments expansifs.

Nos premières études sur les ciments expansifs datent déjà d'une douzaine d'années, consacrées tant à la mise au point de leur fabrication qu'à nous assurer de la stabilité de leurs caractéristiques dans le temps.

En matière de ciments, plus qu'en tout autre domaine, un résultat ne doit être considéré comme réellement acquis que lorsqu'il est confirmé par des observations d'une durée suffisante.

Les applications des ciments expansifs, auxquels, en particulier, la Société Nationale des Chemins de Fer Français a fait une large place, peuvent être multiples, mais, le temps dont nous disposons étant limité, je me bornerai à vous en exposer quelques-unes, choisies parmi les plus typiques que nous ayons réalisées.

a) Fondations par reprises en sous-œuvre.

1. Il s'agissait de la reprise d'un mur d'un bâtiment historique, le Palais Rihour, à Lille, dont les fondations montraient des signes de faiblesse. Le système choisi était le pieu «Méga», de la firme FRANKI.

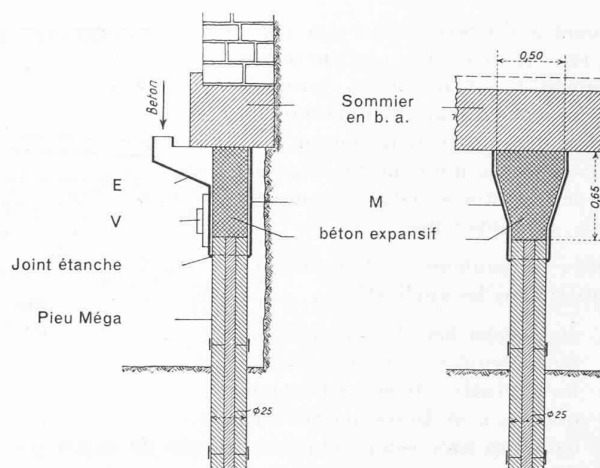


Fig. 14. — Reprise en sous-œuvre
du Palais Rihour, à Lille.

Rappelons que ce pieu est constitué par un ensemble d'éléments en béton armé moulés à l'avance et assemblés sur place. Ils sont enfoncés au vérin. Le point délicat consiste, lorsque la profondeur de fonçage est atteinte, à mettre le pieu en charge sous le mur en assurant son contact parfait avec ce dernier. On y parvient en général en utilisant un élément spécial en forme de U, un vérin, des dispositifs de calage, puis un calage au matoir sous la poutre.

L'emploi du ciment expansif a permis de simplifier considérablement cette opération.

Sur la tête du dernier élément de chaque pieu Méga (fig. 14), on a disposé un moule métallique démontable *M* muni d'un entonnoir *E* pour l'introduction du béton et d'un vibreur *V*.

Une armature légère ayant été placée dans le moule, on a rempli et vibré celui-ci jusqu'à ce que la laitance du béton reflue entre le moule et la poutre. Après la prise et le démoulage, on humidifia le tronçon coulé pendant les quelques jours nécessaires pour obtenir la poussée initiale désirée sous le mur, soit environ vingt tonnes par pieu.

Ce procédé, comparé au premier, a permis d'obtenir une meilleure solidarité de la tête et du corps des pieux et de réaliser une économie d'environ 20 kg d'armature très façonée par élément.

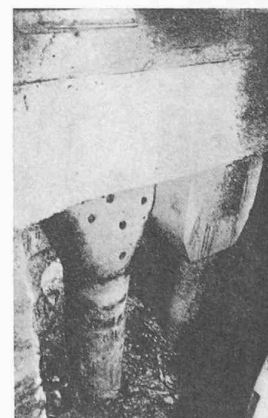


Fig. 15, 16 et 17. — Reprise
en sous-œuvre du Palais Ri-
hour, à Lille. — Différentes
phases de l'opération.

Les figures 15, 16 et 17 représentent les diverses phases de l'opération.

Les trous qui sont visibles sur la figure 17 sont destinés à permettre à l'eau d'humidification de pénétrer dans la masse du béton expansif. L'expansion ne se produit, en effet, que lorsque, quelques heures après la fin de la prise du ciment, on commence à l'humidifier.

Si, en cours d'expansion, on cesse brusquement cette humidification, l'expansion s'arrête *définitivement* après vingt-quatre ou quarante-huit heures, après avoir dépassé de 10 à 40 %, suivant les dosages, l'allongement au moment de l'arrêt.

La cessation de l'humidification constitue donc un mode de réglage de l'expansion sur place aussi simple qu'efficace.

2. La figure 18 représente un dispositif de reprise en sous-œuvre d'un mur au Ministère des Colonies à Paris.

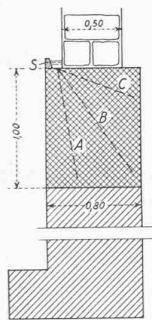


Fig. 18. — Reprise en sous-œuvre d'un mur du ministère des colonies de Paris.

Sur chaque puits en béton ordinaire, on exécute une tête en béton expansif de 1 m de hauteur. Les trous d'humidification A, B et C, de 30 mm de diamètre, espacés de 20 cm, réalisés en disposant provisoirement des barres d'acier que l'on retirait au moment de la prise, communiquaient avec une nappe d'eau maintenue par un simple solin en plâtre.

La force expansive assura la mise en charge des puits sous le mur, sans l'aide de vérins.

3. Notons, en passant, le nombre important des applications possibles dans les travaux de mines, de bourrages autour des voûtes de galeries et de tunnels. Des essais importants sont actuellement en cours ou à l'étude à ce sujet.

b) *Décintrage et clavage de voûtes en béton et maçonnerie.*

Chacun de vous connaît le procédé classique de décintrage d'une voûte à l'aide de vérins que l'on fait agir à la clef avec une force égale ou légèrement supérieure à la poussée horizontale de la voûte au moment de l'opération.

Cette opération comporte alors quatre phases principales :

— la mise en charge des vérins,

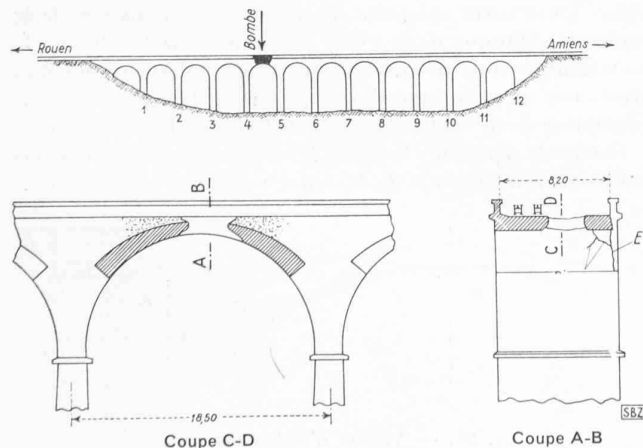


Fig. 21. — Viaduc de Poix.

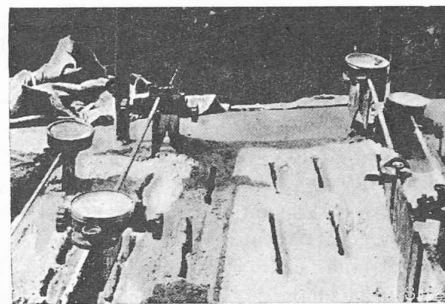
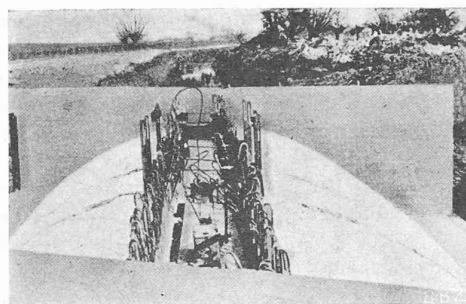


Fig. 19 et 20. — Pont dans le département d'Eure et Loir.

- le remplissage en béton entre ceux-ci,
- après durcissement suffisant de ce béton, l'enlèvement des vérins,
- le remplissage du joint à l'emplacement qu'occupaient ces derniers.

Or, avec le *ciment expansif*, ces quatre phases de l'opération sont ramenées à une *phase unique*.

Il suffit d'exécuter, dans une rainure ménagée à la clef et après durcissement du corps de la voûte, un *voussoir en béton de ciment expansif* qui joue le rôle d'un *vérin intégré* dans la *masse même de l'ouvrage* et qui permet de compenser notamment :

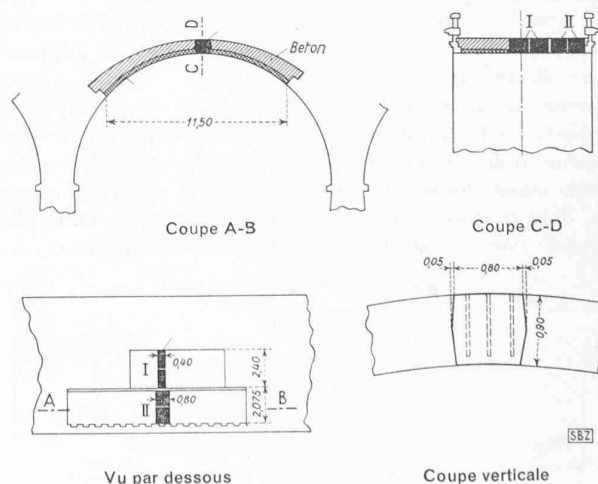
- les raccourcissements élastiques du béton dus à la charge permanente ;
- tout ou partie des raccourcissements engendrés par le retrait et les déformations plastiques du béton dans le temps ;
- au besoin, tout ou partie des déformations dues aux poussées accidentelles.

Dans de grands ouvrages, on peut prévoir plusieurs voussoirs expansifs qui répartissent alors leur action sur toute la longueur de la voûte suivant un processus déterminé à l'avance.

Se rapportant à un pont en arc en béton armé exécuté pour les ponts et chaussées du département d'Eure-et-Loir en France, voici deux projections :

- la figure 19 montre la saignée réservée à la clef pour le logement du voussoir expansif, les armatures de la voûte étant provisoirement relevées,
- la figure 20 représente le dessus du voussoir expansif et les rainures disposées pour permettre la pénétration de l'eau d'humidification dans la masse du voussoir.

On aperçoit les appareils MANET-RABUT destinés à mesurer l'intensité de l'expansion.



Vu par dessous

Coupe verticale

Fig. 22. — Viaduc de Poix — Détails.

Un autre exemple typique est celui de la *réparation du viaduc de Poix*, qui porte la double voie ferrée de la ligne de Rouen à Amiens.

Cet ouvrage, en maçonnerie, compte douze travées en plein cintre reposant sur de hautes piles distantes de 18,50 m d'axe en axe (fig. 21). Les voûtes mesurent 0,90 m d'épaisseur à la clef.

En 1940, ce viaduc avait été partiellement reconstruit par l'entreprise Edmond Coignet, quatre voûtes et deux piles ayant été partiellement détruites.

En 1944, au cours d'un raid de l'aviation alliée, une bombe traversa la voûte de la cinquième travée au voisinage de la clef et excentriquement dans le sens transversal.

La circulation ayant été rétablie à voie unique en utilisant de robustes poutres métalliques au droit de la brèche, la réparation de celle-ci fut prévue comme suit :

Un cintre inférieur de type courant ayant été disposé sous la travée envisagée, les contours de la brèche sont retaillés en vue d'éliminer les parties disloquées de la maçonnerie et, en même temps, de fournir des surfaces d'appui normales aux deux anneaux de remplacement d'inégale longueur et large : de 2 m environ. Chaque anneau est interrompu vers le milieu de la brèche par une saignée d'une longueur voisine du $\frac{1}{14}$ de celle de l'anneau lui-même. Dans cette saignée doit être exécuté le voussoir expansif destiné à mettre l'anneau en précompression dans la brèche, afin de lui assurer artificiellement un rôle actif du même ordre que celui des parties courantes de la voûte.

En d'autres termes, la force expansive initiale doit contribuer à compenser le retrait de durcissement et le fluage des anneaux dans le temps, tout en égalisant la répartition de la poussée permanente sur toute la largeur de la voûte.

La partie courante des anneaux fut exécutée en béton de ciment artificiel ordinaire, avec intrados en béton légèrement armé, afin de lui conserver l'aspect extérieur de la voûte sinistrée (fig. 22).

Dans nos plus récentes réalisations, en général, ce remplissage comporte du béton de ciment dénommé « sans retrait », c'est-à-dire dont l'expansion initiale compense sensiblement le retrait dans le temps.

Les voussoirs expansifs avaient une section en hexagone irrégulier. Ils furent exécutés, le 17 mai 1944, par tronçons d'un mètre de largeur environ, séparés par des joints de très faible largeur, afin de tenir compte de leur expansion transversale. Quelques barres de liaison de petit diamètre étaient placées dans deux directions près des surfaces de contact.

La force expansive nécessaire pour satisfaire aux buts visés ayant été calculée, l'intensité et l'expansion à obtenir furent déterminées expérimentalement à l'aide de l'appareil Faury, décrit précédemment.

Comme je l'ai déjà indiqué au début de cet exposé, le réglage sur place de l'intensité est très simple, car, pour provoquer l'expansion de ces ciments spéciaux, il suffit de les humidifier dans la masse dès la fin de leur prise. Si, au cours de l'expansion, dont la durée normale est, en général, réglée entre cinq et quinze jours, on arrête l'humidification, le gonflement cesse

de croître avec la même rapidité et se stabilise pratiquement en quarante-huit heures environ, suivant une loi connue.

Dans ces conditions, on règle l'expansion sur place en arrêtant simplement l'humidification dès que l'allongement nécessaire, compte tenu de la correction pour le processus de stabilisation après l'arrêt, est atteint.

Au viaduc de Poix, les voussoirs expansifs étaient percés de trous d'un diamètre d'environ 25 mm, distants de 0,25 m à 0,30 m dans les deux sens et s'arrêtant à quelques millimètres de l'intrados. Un petit solin en plâtre, entourant chaque voussoir à l'extrados, permettait de maintenir la nappe d'eau nécessaire à l'humidification. Pour arrêter l'humidification, il est suffisant de percer la pellicule de béton des trous à l'intrados avec une barre de fer ou de siphoner. Conformément aux prévisions, on l'arrêta après cinq jours d'humidification, l'allongement à obtenir, soit 2,7 mm par mètre, étant alors atteint à l'extrados, comme l'indiquaient les appareils Manet-Rabut fixés sur les voussoirs.

Un autre exemple de réparation de voûtes sinistrées est celui du *pont d'Epinay-sur-Seine*, près de Paris.

Cet ouvrage, pour double voie normale, comporte trois travées en maçonnerie de 38,50 m de portée libre et 1,35 m d'épaisseur à la clef.

Au cours des bombardements aériens de 1944/45, le pont fut atteint à plusieurs reprises.

En plus de diverses avaries dont la réparation ne nécessitait pas de dispositions particulières, la première travée rive gauche fut traversée par une bombe dont le point d'impact se trouve sensiblement à 6 m de la clef côté Epinay dans le sens longitudinal et à 1,50 m environ de l'axe de l'ouvrage dans le sens transversal, côté amont (fig. 23).

L'ouverture de la brèche, faible à l'extrados, s'épanouissait largement à l'intrados où son diamètre apparent était de l'ordre de 4 m.

Si l'on tient compte des zones de dislocation qui entourent la brèche, il apparaît donc que la voûte était pratiquement sectionnée sur plus des deux tiers de sa largeur côté amont. Les conditions locales s'opposant à la construction d'un cintre provisoire en Seine pour procéder aux réfections nécessaires, la solution avec cintre supérieur prenant appui à l'extrados sur la voûte elle-même et auquel serait suspendu le plancher de travail, s'imposait.

Deux questions se posaient alors, intéressant respectivement la stabilité de la voûte en cours de travaux et le mode de réparation de la brèche.

Stabilité de la voûte. La solution qui aurait consisté à prendre appui, pour la réparer, sur une voûte sectionnée sur près des deux tiers de sa largeur étant risquée, je proposai de procéder, avant toute autre opération, au rétablissement partiel de la continuité statique de la voûte au droit de la brèche, en la munissant de trois arcs partiels provisoires inférieurs en béton armé, mis en précompression et reportant leur poussée dans l'épaisseur de la voûte, de part et d'autre de la zone avariée.

Comme le représente la figure 24, ces arcs, à plusieurs rayons courbure, sont distants de 1,75 m d'axe en axe. Ils mesurent

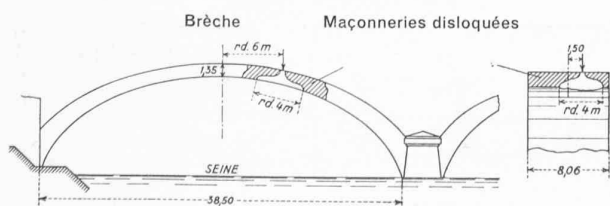


Fig. 23. — Viaduc d'Epinay-sur-Seine.

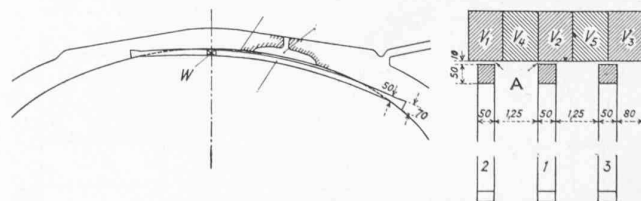


Fig. 24. — Viaduc d'Epinay-sur-Seine.
Disposition des 3 arcs partiels provisoires.

environ 22 m de longueur, 0,50 m de largeur et leur hauteur varie de 0,50 m en partie courante à 0,70 m dans les sections d'encastrement. Ils sont placés à 0,10 m au-dessous de l'intrados au droit de la brèche pour permettre la pose des planchers et calages, et, grâce à leur forme, s'encastrent progressivement dans la voûte vers leurs extrémités. Leurs armatures sont renforcées dans le voisinage de la brèche pour tenir compte des poussées au vide qui peuvent s'y produire sous l'action de la précompression. Des ancrages *A*, souples dans le sens longitudinal, s'opposent au flambage latéral des arcs.

La mise en charge de chaque arc, susceptible de nécessiter des variations d'intensité en cours d'opération, fut réalisée à l'aide d'un vérin d'une force minimum de 100 t, agissant vers la clef de la voûte et qui resta calé jusqu'à l'achèvement de la réparation. Si la poussée à exercer avait été constante, l'emploi de béton expansif aurait constitué la solution la plus simple.

Réparation de la brèche. Les trois arcs partiels provisoires étant construits et mis successivement en charge, la réparation de la brèche s'effectua en principe par la méthode appliquée au viaduc de Poix, déjà décrite, c'est-à-dire par l'exécution successive de cinq anneaux de chacun 1 m de

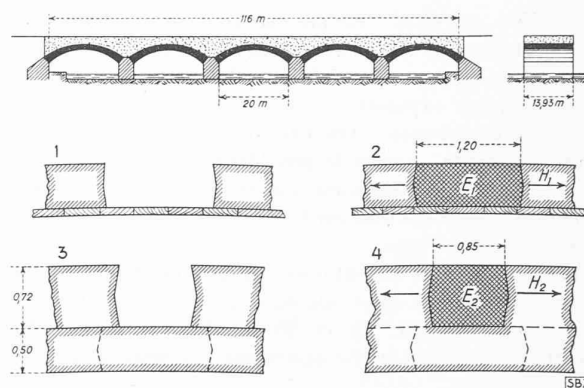


Fig. 25. — Viaduc de Laroche.

largeur, et cela, dans l'ordre de leur numérotage sur la figure 24.

Les voussoirs, en béton de ciment expansif, mesuraient 0,60 m à 0,70 m de longueur et étaient séparés par des joints provisoires d'environ 10 mm de largeur, les anneaux étant, par contre, jointifs dans leur partie courante.

En dehors des réparations partielles d'ouvrages sinistrés, citons la reconstruction complète des voûtes du pont de Laroche qui supporte cinq voies normales de chemin de fer sur la ligne Paris-Dijon.

Cet ouvrage comporte cinq travées de 20 m de portée, surbaissées à 1:4,5, en béton non-armé, mesurant 1,22 m d'épaisseur à la clef et 1,80 m aux naissances. Pour des raisons d'exécution, chacune de ces voûtes fut exécutée en deux rouleaux mesurant respectivement 0,50 m et 0,72 m d'épaisseur à la clef.

D'accord avec les Services de la S.N.C.F., on procéda à quatre opérations successives que représente la figure 25.

Première opération : On coula le premier rouleau de chaque voûte en réservant à la clef une saignée de 1,20 m de longueur pour le logement du premier voussoir expansif.

Deuxième opération : Le voussoir expansif E_1 fut alors exécuté d'après le procédé ordinaire. Ce premier voussoir fut réglé pour subir une expansion voisine de 2,5 mm.

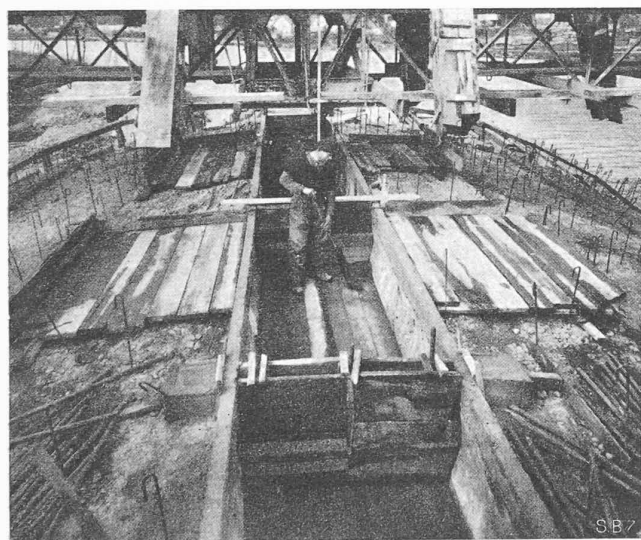


Fig. 26. — Viaduc de Laroche. Coffrage du voussoir E_1 .

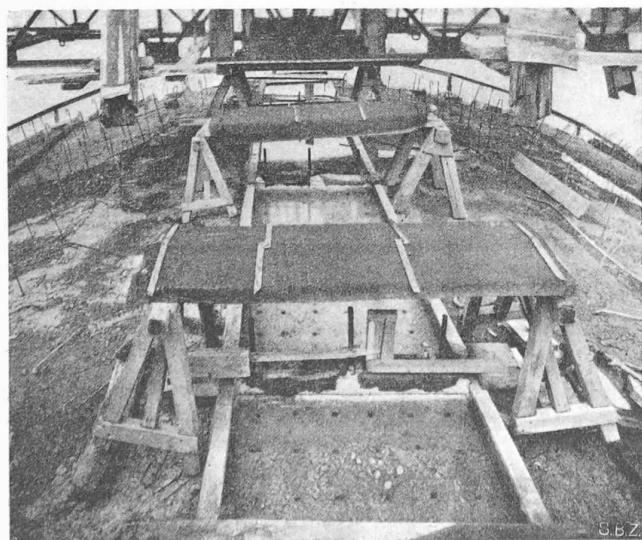


Fig. 27. — Viaduc de Laroche. Voussoir E_1 bétonné.

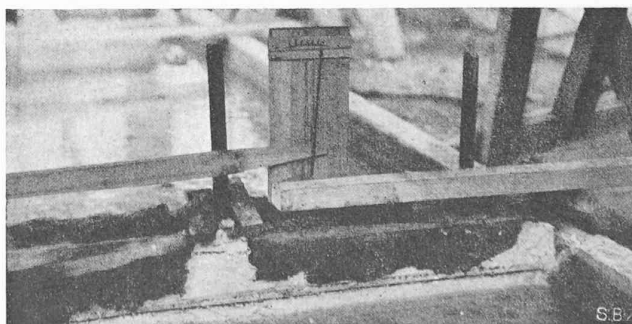
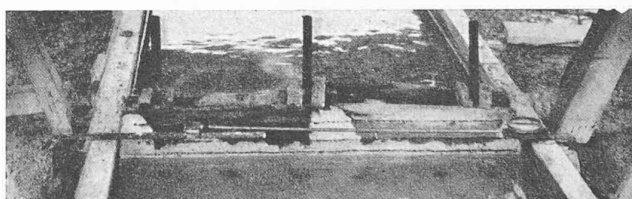


Fig. 28 et 29. — Viaduc de Laroche. Détail du dispositif de mesure des déformations.

Troisième opération : Le premier rouleau de chaque voûte étant terminé, on coula, sur celui-ci, le second rouleau, en réservant une saignée de 0,85 m de longueur pour y loger le second voussoir expansif.

Quatrième opération : On exécuta le second voussoir E_2 de chaque voûte, comme le précédent.

La poussée des voussoirs supérieurs E_2 était réglée de manière à égaler environ les $\frac{3}{10}$ de celle des voussoirs inférieurs E_1 , soit 0,7 mm.

Tous les voussoirs étaient dosés à raison de 600 kg de ciment expansif par mètre cube mis en œuvre.

Les figures 26, 27, 28 et 29 montrent diverses phases de cette réalisation¹ qui fut suivie par plusieurs personnalités étrangères.

(A suivre).

LES CONGRÈS

Centenaire de l'« Institution of Mechanical Engineers », Londres 8-13 juin 1947.

L'« Institution of Mechanical Engineers » a célébré son centième anniversaire à Londres du 8 au 13 juin 1947. Les festivités et manifestations scientifiques, qui eurent lieu à cette occasion, durèrent une semaine et démontrèrent aussi bien la haute valeur scientifique que le prestige, dont cette importante société professionnelle anglaise jouit auprès du grand public et des autorités.

A part le président de l'« Institution of Mechanical Engineers », Lord Dudley Gordon, différentes personnalités prirent la parole à la séance solennelle d'ouverture. Citons le « Lord-President of the Council », le président de la « Royal Society » et, au nom des invités, le vice-président de la Société Royale des Ingénieurs hollandais et l'ancien président de l'« American Society of Mechanical Engineers ». Le soir une réception eut lieu dans le vénérable Musée Technique où, parmi les créations historiques de la technique — anciennes locomotives, machines à vapeur, avions, etc. — le président et Lady Gordon saluèrent personnellement un grand nombre d'invités en grande toilette de soirée. Le ministre britannique de l'Education inaugura l'Exposition Stephenson, organisée à cette occasion.

Une série d'excursions permirent de visiter quelques-unes des principales entreprises, tandis que, chaque matin, les séances scientifiques donnèrent l'occasion d'entendre les rapports d'éminents spécialistes d'Angleterre et d'autres pays sur les derniers progrès de la Technique et de la Recherche expérimentale ainsi que sur les problèmes de la formation professionnelle. Cinq Américains, deux Suisses et un Français étaient inscrits comme rapporteurs étrangers. M. le professeur A. Rohn, président du Conseil suisse d'Ecole, avait été chargé d'exposer les méthodes en usage en Europe (« Continental Practice ») pour le groupe « Education and Practical Training », et M. le Dr Adolphe Meyer « Les usages et tendances européens » (« European Practices and Tendencies ») pour le groupe « Mechanical Plant for Power Stations ». M. P. Soutter, ingénieur, était délégué par la S. I. A.

Il convient de féliciter les organisateurs pour la parfaite réussite de cette manifestation. L'horaire fut rigoureusement respecté et les excursions effectuées en des temps records.

¹ Les essais du pont de Laroche, effectués le 7 juillet 1947, accusèrent une flèche élastique de 0,4 mm sous le passage du train d'épreuve. Voir détails dans le journal français « Travaux » de juin 1947.

La séance de clôture officielle eut lieu dans le célèbre palais historique du « Guildhall », qui présente encore bien des dommages de guerre et a été remis provisoirement en état à l'aide d'un toit et de fenêtres de fortune. Cette dernière manifestation, agrémentée par une musique militaire de membres en uniforme de l'« Institution of Mechanical Engineers » et de l'« Institution of Electrical Engineers », constitua le point culminant des festivités. Conformément à l'ancienne tradition anglaise, le frac était de rigueur. Le dîner officiel, auquel assistèrent les membres les plus éminents du gouvernement et de l'administration, entre autres M. Attlee, président du Conseil, les ministres de l'Education, de la Guerre et du Travail, le « Lord-Mayor » de Londres, le Premier Lord de l'Amirauté, etc., débuta par la bénédiction du « Dean of Westminster ».

Les discours, assaisonnés d'humour anglais, montrèrent aux Suisses que l'ennui n'est pas un attribut indispensable de ce genre de manifestations. Le président du Conseil, M. Attlee, fit l'éloge de l'activité de l'« Institution of Mechanical Engineers » et annonça la création d'un nouvel institut national de recherches dans le domaine des sciences mécaniques, sous la direction du Dr Guy, secrétaire de l'« Institution of Mechanical Engineers ».

L'« Institution of Mechanical Engineers », qui occupe à Londres, au « Storey's Gate », un important immeuble contenant de magnifiques locaux, a prouvé par le succès de son centenaire qu'elle était en état de faire face avec confiance aux tâches qui l'attendent.

P. SOUTTER.

DIVERS

Concours de la Fondation Denzler.

Pour le 7^e thème de concours de la fondation Denzler, publié au Bull. ASE 1945, n° 26, p. 883¹, aucune solution n'a été présentée dans le délai d'une année. La Commission de l'Association suisse des Electriciens (ASE) pour la fondation Denzler a donc décidé, d'entente avec le Comité de l'ASE, de poser de nouveau le même sujet d'étude, toutefois avec un délai de deux années². Le thème du concours est le suivant :

7^e thème de concours.

Etudes relatives au problème du transport de l'énergie sans fil en tenant compte du développement actuel de nos connaissances physiques et techniques.

Explications concernant le 7^e thème de concours.

La question de savoir si un transport d'énergie sans fil serait réalisable est soulevée de temps à autre, notamment par les techniciens du courant fort. Il s'agirait donc de se rendre compte si nos connaissances physiques et techniques actuelles permettraient ou non de résoudre ce problème. Nous estimons que la chose est parfaitement possible, puisque le transport de l'énergie électrique se ramène en fin de compte à un rayonnement d'énergie et qu'il s'agit d'obtenir, le long de la voie prescrite pour le transport, la densité d'énergie nécessaire dans un diélectrique ou la valeur nécessaire du vecteur radiant (théorème de Poynting). Ceci est possible le long de conducteurs, car ceux-ci permettent de guider et de concentrer les champs. Par contre, dans le cas de radiations dirigées sans fil, cela est difficile à réaliser, étant donné qu'un groupage serré des faisceaux exige des ondes extrêmement courtes, qui ne peuvent guère permettre une grande puissance (relations entre la fréquence et la grandeur du générateur, entre cette dernière et les pertes admissibles par échauffement). Toutefois il existe actuellement des tubes électroniques capables de fournir

¹ Voir aussi Bull. techn. Suisse rom., t. 72 (1946), N° 5, p. 67-68.

² Voir les détails dans le Bull. ASE, t. 38 (1947), N° 12, p. 360-361.