

Zeitschrift: IABSE reports = Rapports AIPC = IVBH Berichte
Band: 57/1/57/2 (1989)

Artikel: Sauvegarde de monuments historiques grâce à la précontrainte
Autor: Zanker, Philippe
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-44324>

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: 21.02.2026

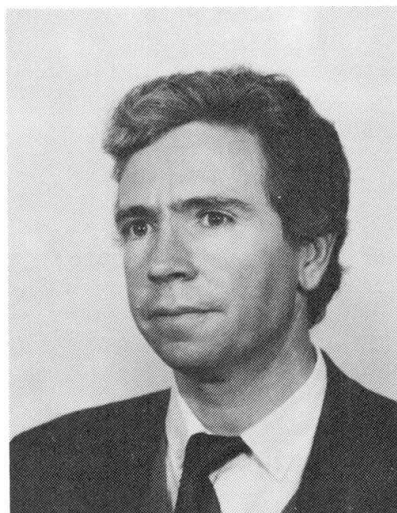
ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Sauvegarde de monuments historiques grâce à la précontrainte

Erhaltung historischer Bauten dank Vorspannung

Preservation of Historic Monuments using Prestressing

Philippe ZANKER
Ingénieur Génie Civil
Freyssinet International
Coignières, France



Né en 1951, obtient son diplôme d'ingénieur à l'Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse. Depuis 12 ans chez Freyssinet il est responsable de L'agence Ile de France, et s'intéresse tout particulièrement aux techniques de renforcement de structures.

RÉSUMÉ

L'évolution constante des techniques de précontrainte extérieure déjà très utilisées dans le cas de renforcement de structures en béton armé ou précontraint leur permet aujourd'hui d'être appliquées aux ouvrages anciens en maçonnerie. L'idée de mise en charge active lors de reprise en sous oeuvre répond à un besoin croissant de confortement des édifices anciens. Ces techniques dynamiques nécessitent des études spécifiques, et une réalisation très méthodique. Le confortement de l'Arc de Triomphe à Paris illustre parfaitement l'application de ces techniques nouvelles au cas des édifices anciens.

ZUSAMMENFASSUNG

Die Technik der aussenliegenden Vorspannung ist derart ausgereift, dass sie auch auf historische Mauerwerksbauten angewandt werden kann. Die Vorspannung im Laufe von Instandstellungsarbeiten entspricht einem wachsenden Bedürfnis zur Erhaltung historischer Bauten. Diese neuen Techniken erfordern spezifische Untersuchungen und eine sehr methodische Anwendung. Das Beispiel des Triumphbogens von Paris zeigt bestens die Anwendung dieser neuen Technik bei Baudenkmäler.

SUMMARY

The constant development of exterior prestressing for structures in reinforced concrete facilitates their application to historic masonry structures. Prestressing during rehabilitation works responds to a growing need. This novel technique requires specific studies and a methodical realisation. The example of the 'Arc de Triomphe' in Paris illustrates perfectly the application of this new technique to ancient structures.



1. HISTORIQUE

L'Arc de Triomphe de l'étoile a été construit de 1805 à 1835. Napoléon voulu ériger l'Arc de l'Etoile à la gloire des armées de la Révolution immortalisées sous son commandement alors qu'il n'était que le Général BONAPARTE. Lentement construit d'après les plans de Chalgrin, la construction connu bien des hésitations. Lors de l'abdication de Napoléon en 1815, l'imposte de la grande arcade était posée avec la 45ème assise.

Louis XVIII ne reprit la construction qu'en 1824 sous la direction des Architectes GOULT et HUYOT. En 1830, Louis PHILIPPE reprit la pensée initiale de Napoléon au profit des armées républicaines. BLOUET succéda à HUYOT en 1833 et introduit dans le volume général la grande salle qui réhaussait de 8 m la terrasse terminale. Le monument mesure 45 m de longueur par 25 m de largeur et 50 m de hauteur, pour un poids total de 50000 tonnes.

2. PATHOLOGIE DE L'EDIFICE

2.1 Apparition des désordres

En 1985, quelques pierres se détachent de la voute et de la façade de l'Arc. Examen visuel permet d'identifier les fissures et d'en tracer le relevé. Début 1987, le Cabinet Michel BANCON spécialisé dans les études de structure et de la réhabilitation des édifices anciens a été chargé d'une expertise du bâtiment afin de définir un programme de réhabilitation.

2.2 Campagne de mesure et d'essai

Afin d'établir un diagnostic précis et déduire les origines du phénomène et la nature des travaux les plus rationnels, une série de mesures a été opérée :

- mesures de vibrations au sol et dans la partie supérieure,
- équipement des fissures et mesures de leur évolution,
- pose sur l'édifice de niveau de précision et suivi de leur évolution,
- mesures de la rotation des piles et de leur verticalité,
- mesures de l'horizontalité des corniches sur les 4 faces,
- forages dans les fondations au droit des piles avec examen endoscopique,

2.3 Analyse des désordres

Cette analyse, facilitée par l'existence des plans de l'édifice a permis à Michel BANCON de constater que le bâtiment souffrait d'un tassement des fondations avec un mouvement hélicoïdal de l'Arc.

Les fondations constituées de gros blocs en pierre ont subi des mouvements consécutifs à la dégradation de leur joint. L'eau de pluie de l'esplanade, l'eau de ruissellement des façades et l'eau de terrasse canalisée vers des collecteurs sans doute fuyards est la cause des circulations d'eau qui délavent les joints de fondation entraînant une forte altération du mortier à la chaux aérienne. Le tassement différentiel des fondations ainsi généré, entraîne une déformation dite en selle de cheval en partie supérieure de l'édifice avec une tendance à l'éloignement des sommets de piles dans le sens des petits côtés et d'une convergence des piles dans l'autre sens. Michel BANCON explique ce comportement différentiel par la configuration des nombreuses cavités ménagées dans l'Arc qui par leur emplacement et leur géométrie sollicitent plus le bâtiment dans l'axe des petits côtés. Une analyse par libération des contraintes montre que celles-ci sont variées à l'intérieur des maçonneries de 0 à 50 bars.

2.4 Travaux de confortement

Ces analyses ont permis d'établir un plan de confortement comprenant 5 phases :

- a) Traitement des joints de maçonnerie par injection partielle de coulis spéciaux dans les fondations.
- b) Traitement des fissures en superstructures par injection de coulis ciment.
- c) Confortement des superstructures par mise en place des tirants précontraint à l'intérieur de l'édifice, objet de notre communication.
- d) Injections complémentaires au coulis dans les massifs de fondation.
- e) Etanchéification des abords de l'Arc.

3. CONFORTEMENT DES SUPERSTRUCTURES PAR PRECONTRAINTE ADDITIONNELLE

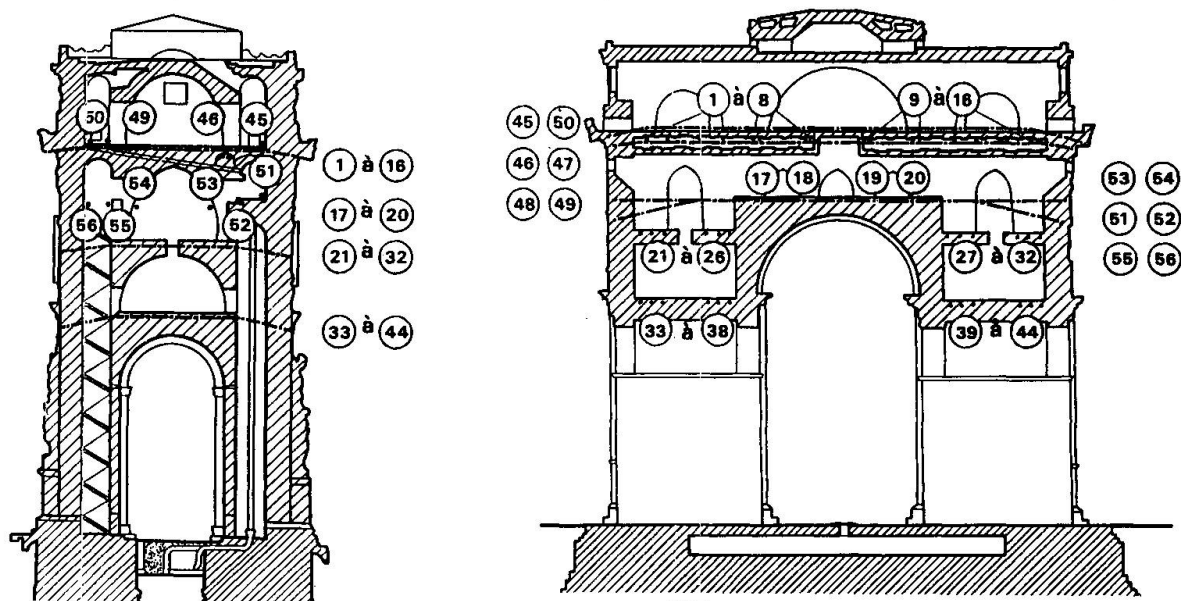
3.1 Principe

Dans le cas de l'Arc de Triomphe, il s'agit d'une précontrainte additionnelle réalisée à l'intérieur de la structure permettant de recomprimer les zones fracturées et de recentrer les efforts obliques engendrés par la poussée des voutes.

Cette précontrainte additionnelle est réalisée par 112 1/2 tirants ancrés dans les parements et raccordés par paire en leur milieu par des coupleurs actifs.

La répartition des 56 tirants tient compte de plusieurs facteurs :

- le rééquilibrage des contraintes qui nécessite 4 étages de tirants dans le sens du petit côté et 2 étages suivants le grand côté.
- la présence d'équipement existant à l'intérieur de l'ouvrage,
- le phasage des travaux, la mise en tension devant pouvoir se faire de manière progressive, afin d'équilibrer les efforts à répartir.
- la possibilité de réglages ultérieurs des efforts dans les tirants,
- l'esthétique finale du renforcement compatible avec le cadre de l'édifice,

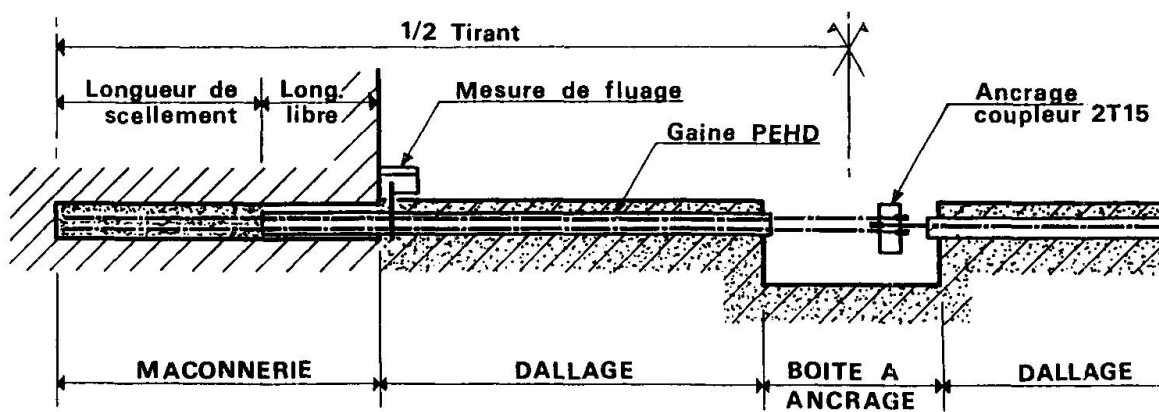


IMPLANTATION DES TIRANTS

3.2 Définition du tirant

Chaque tirant est réalisé en 2 parties symétriques comprenant chacune 3 zones.

- 1° La zone d'ancrage située à l'intérieur des maçonneries permettant d'ancrer l'effort de précontrainte au voisinage du parement extérieur.
- 2° La zone de tension située dans une réservation de maçonnerie au milieu du tirant permettant le raccordement et la mise en tension du tirant.
- 3° Les zones libres situées entre les ancrages de maçonnerie et le coupleur central permettant la transmission de l'effort de précontrainte.





L'effort nominal maximum à l'ancrage est de 42,5 T. Il est obtenu par 2 torons en acier dur T.15 Euronorm Super tendus à 80% de FRG.

La tension est réalisée par un ancrage coupleur FREYSSINET 2T15 au moyen d'un vérin hydraulique double corps et double effet.

3.3 Ancrage de l'effort dans la maçonnerie

La réservation nécessaire à l'ancrage dans la maçonnerie est matérialisée par un forage en rotation pure, carottage ou marteau fond de trou. Le forage est réalisé de manière à pouvoir s'ancrer le plus près possible du parement extérieur en gardant une marge d'environ 25cm, afin de ne pas le traverser. Les paramètres qui caractérisent l'ancrage sont :

- diamètre du forage,
- mode d'exécution du forage,
- longueur de scellement,
- méthode de cintrage et de frettage des torons dans la zone de scellement,
- nature du coulis de scellement,

Leur définition a nécessité de nombreux essais préliminaires réalisés *in situ* avant les travaux de mise en oeuvre proprement dit des tirants et sont décrits au chapitre 4.

3.4 Parties libres du tirant

Les parties libres extérieures du tirant sont réalisées en double protection. Le toron T15 (\varnothing 15,7mm, section 150 mm²) est logé dans une gaine plastique et protégé par une graisse anti-corrosive. Cette opération réalisée en usine permet une auto protection à l'origine du toron.

Lors du façonnage sur le chantier, les 2 torons formant tirant sont enfilés dans une gaine polyéthylène haute densité qui est injectée au coulis de ciment après mise en place du tirant.

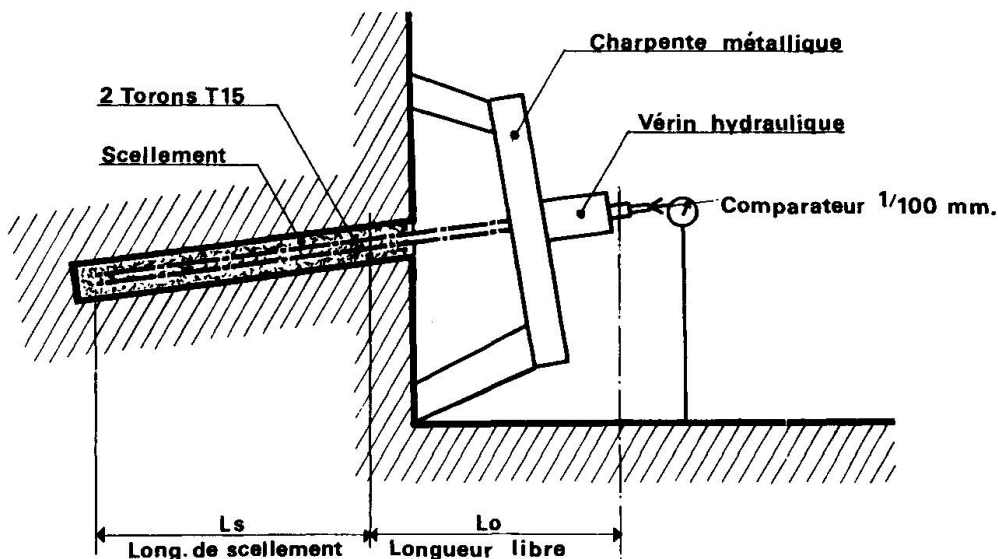
L'armature T15 en partie libre se trouve ainsi sous double protection dans un film de graisse qui va permettre sa mise en tension et d'éventuelles reprises de tension ultérieures.

La partie active, ancrage coupleur 2T15 reste accessible dans sa réservation fermée et protégée dans un capot injecté à la cire.

4. ESSAIS PRELIMINAIRES

4.1 Principe

Les essais préliminaires réalisés en vraie grandeur sur le site dans des zones jugées représentatives des cas les plus défavorables ont permis de définir les caractéristiques de l'ancrage dans la maçonnerie. Ils ont également permis d'affiner la méthode de mise en charge des tirants avec contrôle de la fiabilité. Le principe de montage de l'essai est le suivant :



On mesure l'allongement Δl du toron en fonction de F effort appliqué.

F est appliqué par palier de 5 Tonnes de 10 à 40 Tonnes avec pour chaque palier la mesure des allongements dans le temps :

- toutes les minutes de 0 à 5 mn,
- toutes les 5 mn de 5 à 30 mn,

Pour chaque palier d'effort, la pression est maintenue constante pendant les 30mn de mesure d'allongement.

4.2 Interprétation des résultats

Les premiers essais réalisés ont mis en évidence la nécessité de réaliser un prétraitement de la maçonnerie dans la zone d'ancrage. Ce prétraitement consiste à réaliser une injection à pression contrôlée de coulis de ciment en fond de forage, afin de colmater les vides existants dans les joints de pierre au voisinage immédiat de la zone de scellement.

Au total 14 essais d'ancrage ont été réalisés et l'analyse des tableaux de résultats de mesure a permis de définir que :

- le diamètre et le mode d'exécution du forage ne sont pas des facteurs déterminants.
- la longueur optimale du scellement pour 40 T est de 3ml.
- les torons doivent être positionnés et centrés correctement pour assurer un parfait enrobage du coulis de scellement.
- l'écrouissage de la maçonnerie est important lors de la première mise en charge.
- le fluage du scellement est le critère de contrôle à suivre lors de la mise en tension.

4.3 méthode de mise en charge

Chaque tirant est mis en tension par palier d'efforts et de temps en "diagonale" avec contrôle du fluage en tête de forage.

- pour 10 T. à 2 mn (avec correction d'origine) 15 T. à 5mn, 20 T. à 10mn, 25 T. à 15mn, 30 T. à 20mn, 35T. à 25mn, et 40 T. à 30mn.

Chaque valeur de mesure est immédiatement positionnée sur un graphique théorique préparé à l'avance où elle doit se situer à l'intérieur d'un fuseau admissible. Toute dérive à l'extérieur du fuseau entraîne l'arrêt de la mise en tension si les 40 Tonnes ne sont pas atteintes.

5 MISE EN OEUVRE DES TIRANTS

5.1 Exécution des réservations

L'exécution des réservations comprend :

- l'amorce de saignée contre le parement,
- le forage de la maçonnerie pour ancrage des tirants et passage de la gaine.

Les techniques de base du forage sont celles du carottage à l'air avec lubrification à la mousse et la technique de forage destructif avec des marteaux fond de trou à très faible énergie de frappe, cette technique pouvant se révéler la seule efficiente dans les zones de maçonnerie présentant des pierres abrasives et de forte résistance.

- les saignées dans les dalles pour réservation du passage de gaine qui sont réalisées par sciage des limites à la scie de sol, puis piquage de la zone entre traits de scie pour obtenir une réservation d'environ 10x10 cm.

Après mise en place du tirant, la saignée est remplie au mortier de chaux avec finition de surface aux mortiers spéciaux.

- les chambres dans les dalles pour réservation de l'ancrage coupleur et des appareillages de contrôle de tension sont réalisées comme précédemment.

Les chambres devant rester accessibles sont ragréées au mortier de chaux sur leurs 4 faces latérales et le fond.



5.2 Préfabrication des tirants

Les 1/2 tirants sont préfabriqués sur le chantier le long d'une aire abritée aménagée à cet effet. A partir des plans d'exécution, après contrôle des dimensions in situ, les torons sont coupés à longueur et dégainés, puis dégraissés sur leur longueur de scellement. Sur cette longueur les câbles seront détorseillés pour permettre la mise en place d'une olive en extrémité et équipés de centreurs. Le tirant ainsi préparé est enfilé dans le forage avec un tube évent plongeur.

5.3 Scellement du tirant

Après enfilage du demi tirant on réalise un obturateur avec évent de purge en tête du forage. Le scellement se fait par le tube évent plongeur au coulis de ciment C/E=2 avec 2% d'intraplast Y en fin de remplissage le tube plongeur est extrait et on réalise par le tube évent un maintien en pression du coulis à environ 2 bars pendant 15mn.

5.4 Fixation des parties libres

Après scellement de l'ancrage, la partie libre est enfilée dans une gaine PEHD, soit posée dans les caniveaux aménagés, soit fixée le long des parois par des colliers supports. Le raccordement de 2 demi tirants jumelés se fait dans la chambre de tension grâce à l'ancrage coupleur FREYSSINET type 2T15 ; un équipement spécifique de mesure d'allongement est réalisé sur le câble en tête de chaque forage ; la gaine PEHD est alors injectée au coulis de ciment.

5.5 Mise en tension

La mise en tension des tirants se fait systématiquement par groupe de 2 ou 4 tirants au moyen de vérins hydrauliques FREYSSINET, type Twin Jack. Elle est réalisée par palier comme indiqué au § 4.3 avec contrôle strict du fluage par rapport à la courbe théorique d'étalonnage. Après mise en tension l'ancrage coupleur reçoit un capot inox en demi coquilles qui après fixation est injectée à la cire, les chambres de tension étant équipées de couvercles métalliques. Cet ensemble permet de réintervenir à tout moment pour modifier l'effort de tension.

5.6 Cas des tirants à scellement court

Pour environ 10 tirants l'épaisseur des parements de maçonnerie limite la longueur de scellement à 1,80m. Aussi des modifications techniques ont été nécessaires.

- augmentation du diamètre de forages à 100mm,
- centrage et frettage des torons par une spire Ø 6 au pas de 10 cm,
- scellement du tirant en mortier spécial sans retrait,

6. INTERVENANTS ET REMERCIEMENT

Je tiens à remercier tous les intervenants impliqués dans cette opération délicate.

- Cabinet Michel MAROT, Architecte des Bâtiments Civils et Palais Nationaux,
- Fernand TOMASINA, Vérificateur des Bâtiments Civils, Palais Nationaux et Monuments historiques,
- Bureau Michel BANCON, Ingénieurs Experts,
- CEBTP, Laboratoire d'Analyses,
- SOLETANCHE et RONTAIX, Sociétés partenaires de FREYSSINET sur cette opération
- PX CONSULTANT, Ingénieurs Conseils,
- Ainsi que le Ministère de la Culture et de la Communication.