

LA CONCEPTION DES OUVRAGES EN BÉTON ARMÉ AU DÉBUT DU 20^{ÈME} SIÈCLE : APPROCHES VISIONNAIRES DE ROBERT MAILLART. 1872-1940

Denis Zastavni

INTRODUCTION

La dimension innovante de l'œuvre de Robert Maillart en matière de conception en béton ne se conçoit que mise en perspective dans l'histoire de la construction et des matériaux de structure. Plus particulièrement du béton. Ce propos nous mènera sur le terrain de la conception structurale contemporaine avec le béton.

Nous commencerons par contextualiser historiquement notre analyse. Puis un détour par nos approches contemporaines permettra d'expliquer les aspects les plus révolutionnaires de l'approche de Maillart. Dans la manière dont la complexité intrinsèque du béton a été considérée, certaines difficultés proviennent du comportement du béton au regard des théories classiques de la mécanique. Si nos théories modernes ont apporté une réponse au problème, Maillart avait déjà trouvé une manière convaincante de le gérer. En examinant le statut qu'il donnait au matériau lorsqu'il était question d'aborder la conception structurale d'un ouvrage, et les méthodes qu'il a employées pour atteindre ses objectifs, nous verrons ce qui fait tout l'intérêt de son approche et de son œuvre.

Figure 1 : Pont du Salginatobel, 1929²⁶

PRÉSENTATION DE L'ŒUVRE DE MAILLART

L'ingénieur suisse Robert Maillart naît en 1872 et décède en 1940. Il travaille sur plus de 300 structures - parmi lesquelles on trouve une cinquantaine de ponts - entre la fin du 19^{ème} siècle et 1940^{1,2}. Maillart était connu pour les formes innovantes qu'il donnait à ses structures réalisées en béton armé. À cette époque où le béton était associé à un matériau lourd mis en œuvre dans des structures d'aspect très massif, Maillart produisait des structures en béton d'une légèreté inégalée mais avec un degré important de fiabilité et de durabilité. Ceci signifie qu'il est question d'une approche pleinement rationnelle pour l'élaboration des schémas structuraux de ses ouvrages.

À l'époque où il pratique, la réflexion sur la forme qu'il convient de donner au béton bat son plein. La part d'innovation la plus manifeste portée par Maillart concerne les formes et les systèmes structuraux. Il est notamment question du « Système Maillart », l'arc-caisson en béton armé, qu'il invente en 1901³.

Maillart promeut et fait usage de différentes typologies structurales pour les ponts en béton :

- les arcs à trois articulations pour lesquels il propose des formes révolutionnaires ;
- les arcs raidis qu'il invente en transposant au béton des principes suggérés par Ritter ;
- des arcs avec une ligne des pressions fortement excentrée, à savoir fléchis ;
- des ponts-poutres continus aux formes singulières.

Pour les bâtiments, il promeut une vision toute personnelle des dispositions structurales connues sous le nom de dalles-champignons.

Méthodologiquement, Maillart innove par l'usage de la statique graphique comme d'un outil de conception pour la forme structurale - la morphogenèse. En effet, lorsque Karl



Culmann⁴ imagine en faire une discipline cohérente et pleinement constituée, c'est dans la perspective différente de l'employer pour l'analyse structurale.

Maillart maîtrisait les arrangements structuraux complexes en employant intuitivement des principes structuraux contemporains établis et démontrés bien plus tard. La complexité du comportement du béton armé est gérée en s'appuyant sur le statut spécifique donné au matériau au sein du schéma structural⁵. Il gérait pareillement la complexité des travaux de ferrailage au sein des structures, optant pour des dispositions qui étaient aisément mises en œuvre.³

REPÈRES HISTORIQUES

L'histoire du béton armé débute aux environs du milieu du 19^{ème} siècle. L'idée du ferrailage vient de Lambot et Monier. Des structures combinant fer et béton font ensuite rapidement leur apparition avec Coignet et Wilkinson. Dès 1880, des brevets sont déposés sur des éléments de structure en béton armé (en particulier de poutres). Les premiers ponts en béton apparaissent également à cette époque.^{6,7,8}

L'étrier proposé par François Hennebique en 1892 complète l'étude de la composition interne des poutres entamée par Monier, Koenen et d'autres. Dès lors, la logique des dispositions de ferrailage devient complète.

Avec le béton armé, cette pierre reconstituée change de statut : d'un matériau associé avec des murs et des massifs, souvent fissurés, il devient un matériau fin, léger, étanche et même « élastique ». Il devient à même de concurrencer l'acier et le bois.

La conception de formes structurales en béton et leur calcul sont des pratiques différentes. Différents aspects doivent être pris en compte pour atteindre des dispositions sensées. Une réflexion quant aux formes adéquates doit être menée. À l'époque, concevoir la forme signifiait raisonner en termes de systèmes, qui étaient une association particulière de fer et de béton au sein d'une section prédéfinie. Les méthodes de calcul n'étaient pas diffusées.

LES APPROCHES CONTEMPORAINES

De nos jours, ces méthodes sont décrites dans les normes et nous disposons d'outils pour gérer les analyses structurales complexes. Mais les capacités limitées de résistance du béton en traction, ses modalités d'interaction avec l'acier de ferrailage, la fissuration et les modifications des propriétés mécaniques qu'elle entraîne, le fluage et le retrait, l'importance de l'historique de chargement s'accroissent très imparfaitement de l'approche élastique employée par les logiciels de calcul classiques. Si on y ajoute les imprécisions de l'exécution et des forces ou réactions réellement rencontrées, qui contrastent avec la précision de l'analyse numérique et la questionnent, le regard porté sur la conception peut devoir être reconsidéré.

On sait depuis les travaux de Kazinczy en 1914, puis ceux de John Baker en 1926 toute la différence qu'il peut y avoir entre l'analyse élastique la plus rigoureuse et les contraintes mesurées dans une structure réelle⁹. Ceci a mené à l'approche gouvernée par le calcul plastique. Celle-ci a été énoncée en russe dès 1936 par Gvosdev. La version internationale en langue anglaise date de 1949-50 avec les travaux de Greenberg, William Prager et Horne. Ses théorèmes (le théorème statique, dit de la borne inférieure et le théorème cinématique, dit de la borne supérieure) caractérisent la réponse structurale dans un état proche de la ruine. Ils mènent chacun à des méthodes analytiques propres, mais surtout lèvent la plupart des objections énoncées ci-dessus.

En particulier, le théorème statique fournit un cadre théorique particulièrement approprié à la conception structurale, ce qui permet de prendre ses distances pour la majorité du processus de conception avec toute la lourdeur et les contraintes de l'analyse structurale. Et ce contexte sera celui auquel Maillart recourt, bien intuitivement, dès la fin des années 1800.

Le contexte du calcul plastique s'applique à celui de l'usage de matériaux plastiques idéaux. S'il est des stratégies pour s'accommoder néanmoins de matériaux « normalement » ductiles, il est cependant pleinement justifié de l'appliquer à des matériaux fragiles si des formes de précontraintes s'y appliquent, ou là où agit le poids propre, ce qui s'avère particulièrement judicieux pour le béton, même non armé¹¹. C'est précisément la raison pour

dations de Wilhelm Ritter, il articule l'arc en trois points pour éviter tout endommagement.

Ensuite, ce principe de l'intégration des sections mène simplement à la création de connexions rigides entre l'arc et les murs qui portent le tablier, puis avec le tablier lui-même. Le premier arc-caisson en béton était créé, et il n'y avait alors aucun moyen de calculer la structure ainsi constituée (selon Ritter³⁹).

En raison de cette complexité, Maillart négligeait ou laissait de côté tout élément mineur de la composition structurale pour être en mesure de vérifier la stabilité de l'ensemble. Cela signifie que Maillart identifiait d'abord des mécanismes indépendants (l'arc, la dalle du tablier, les poutres du tablier, etc.) et les associait à l'ensemble. Ensuite, il ne tenait compte que de certains éléments spécifiques de cette association complexe ; en d'autres termes, il se référait seulement à certains schémas statiques particuliers au sein de la structure réelle. Cette manière intuitive de procéder est très proche de nos approches modernes qui seraient liées au théorème statique du calcul plastique¹³. Si cette méthode n'est pas employée de la manière la plus élégante et considérée pour la conception du pont de Zuoz, l'approche se rationalise avec ses œuvres postérieures.

- Le pont de Tavanasa de 1905 (Fig. 2) poursuit la démarche suivie à Zuoz. Des variations d'inertie sont consciencieusement appliquées aux sections successives de l'arc, en considération du principe de l'arc à trois articulations. Les différentes sections sont affinées et s'hybrident en fonction de leur fonction structurale : tantôt entre la section en U et les sections TT, tantôt entre le caisson et les sections ouvertes.

Avec le pont de Zuoz de 1901, Maillart invente l'arc-caisson en béton armé, le premier caisson jamais construit³. À l'origine de ce dispositif, est une section en U qu'il donne à l'arc supposé fonctionner à la manière des voûtaisons en maçonnerie. Dans la lignée des recomman-

L'approche s'illustre particulièrement avec les ponts en arcs raidis. Il s'agit de l'association complémentaire de deux principes structuraux distincts : un arc funiculaire et un tablier jouant le rôle de poutre raidisseuse pour l'arc. C'est l'inversion parfaite du principe du pont suspendu, comme suggéré par son professeur Wilhelm Ritter¹⁴. Il s'agit aussi d'une nouvelle application du théorème statique du calcul plastique : deux systèmes structuraux distincts et élémentaires associés au sein d'une même structure.

Pour activer ces mécanismes, il s'agit de concevoir des différences de rigidité flexionnelle suffisamment importantes pour chaque élément de construction et des rigidités suffisamment différentes eu égard aux forces de compression. De cette manière, on spécialise certains éléments dans la reprise des efforts de flexion, et d'autres dans la reprise des efforts de compression, tantôt pour la reprise du poids propre et tantôt pour les charges d'exploitation. Le ratio des rigidités développées à l'égard des forces de compression est atteint en agissant sur la géométrie. La disposition correcte des membrures est la clef qui permet de développer des résistances importantes vis-à-vis des forces axiales. Cette question est gérée par la statique graphique.

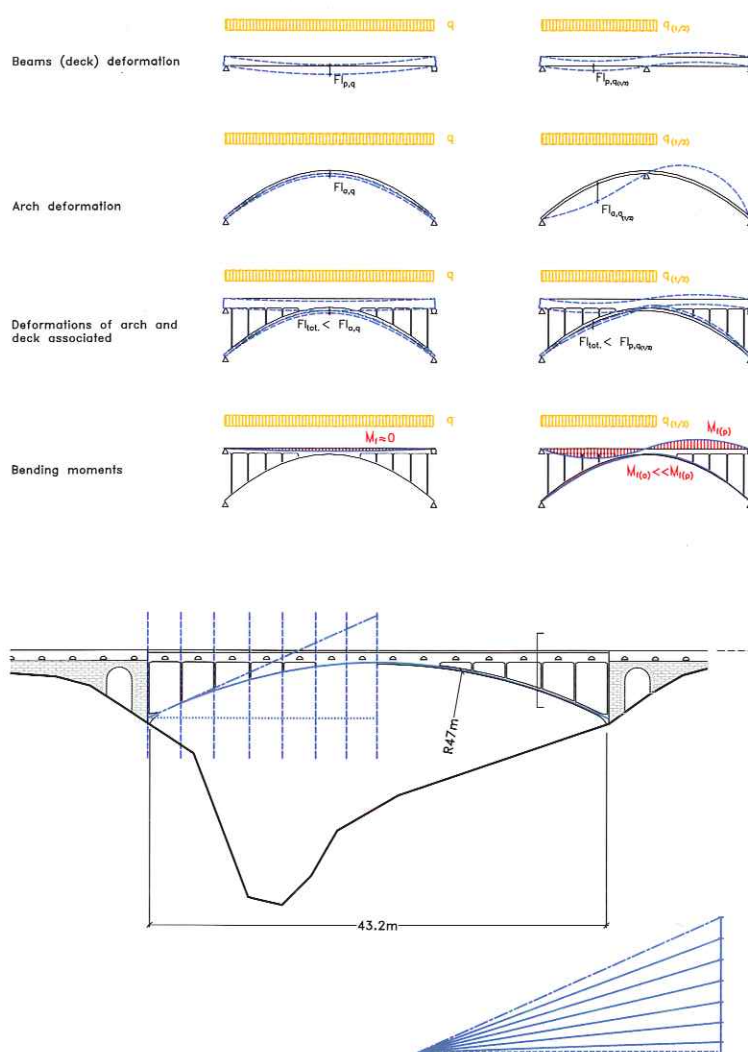


Figure 3 : Pont du Val Tschiel, 1924²¹



Figure 4 : Mécanisme du pont en arc raidi²²

Figure 5 : Conception du Pont du Val Tschiel²³

Figure 6 : M_f sur le pont du Val Tschiel²⁴

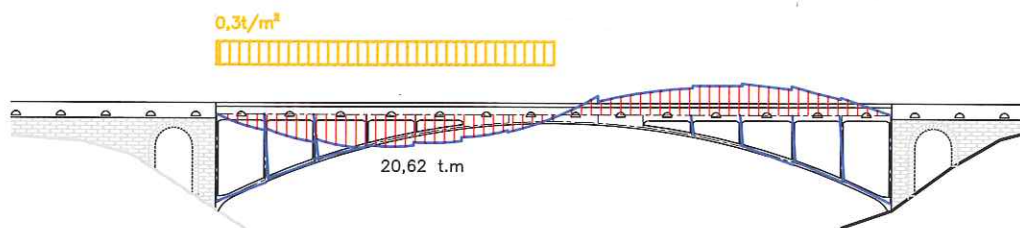
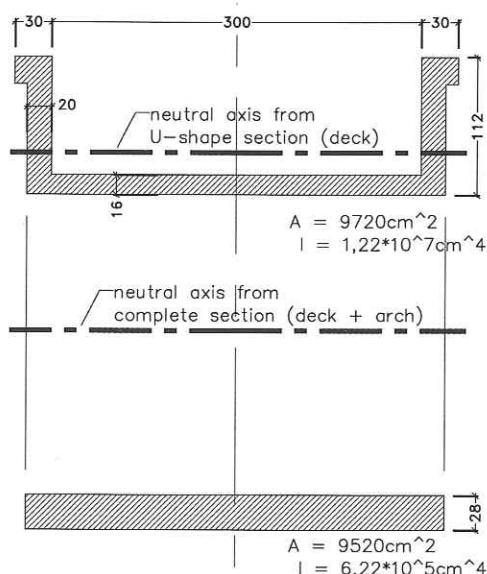


Figure 7 : Caractéristiques mécaniques du pont du Val Tschiel²⁵



Par la définition judicieuse des rapports de rigidité entre l'arc et le tablier, les interactions indésirables entre éléments sont évitées, quelle que soit la complexité de l'arrangement structural.

Figure 8 : Pont du Salginatobel, 1929²⁶



Les premières fois que ce principe est mis en œuvre, l'arc est resté circulaire avec une ligne des pressions funiculaire très proche de son axe. Plus tard, Maillart étudie la géométrie des arcs pour suivre parfaitement la ligne funiculaire correspondant à un cas de charge de référence, comme pour le pont de Schwandbach (1933).

Une analyse numérique démontre que le fonctionnement structural est conforme aux principes énoncés ci-dessus, qui sont davantage l'essence de l'approche de Maillart de la question structurale qu'une interprétation du comportement structural à l'œuvre. On peut de la même manière se demander si Robert Maillart était obligé d'employer la statique graphique parce qu'il n'aurait pas eu d'alternative pour calculer ses structures.

Dans le pont du Salginatobel (1929) (Fig. 1 et 8), on observe les influences convergentes des premiers arcs à trois articulations de Maillart et des ponts en arcs raidis. Son comportement structural est celui d'un arc articulé.

La réalisation récursive d'épures de travail en statique graphique a permis à Maillart de mener un important travail sur la définition des sections symétriques en caisson¹⁵ : les proportions de l'ouvrage et les caractéristiques mécaniques évoluent constamment le long du pont.

Les épures qui nous sont parvenues, montrent comment Maillart s'est assuré qu'il était parvenu à la forme correcte pour permettre au mécanisme structural qu'il avait défini d'être effectif¹⁵. L'histoire des sciences de l'ingénieur regorge de méthodes algébriques ou de méthodes ayant recours à l'analyse différentielle et ses contemporains reprochaient à Maillart le mépris pour les méthodes analytiques. Ils considéraient ses méthodes peu orthodoxes, faute de comprendre le contexte dans lequel il les employait^{3,9}.

Maillart a employé la statique graphique non seulement pour l'analyse mais également pour d'autres objectifs : la détermination des trajectoires d'effort pour matérialiser les structures

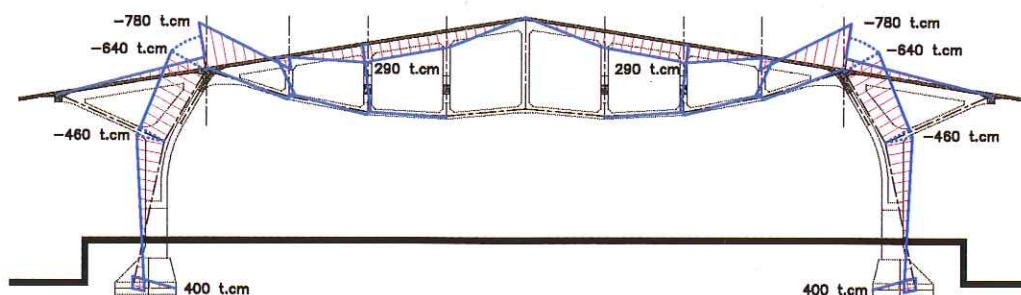


Figure 9: Moments fléchissants sur le hangar de Chiasso, 1923²⁷

en béton (morphogénèse), pour corriger les géométries en cours de conception de manière à équilibrer les forces en présence (optimisation de la réponse structurale). Pour son hangar à Chiasso (Fig. 9), il n'est pas possible d'expliquer la géométrie sans la construction d'équilibres à l'aide de la statique graphique.¹⁶

Ce projet illustre le statut des matériaux et des parties constituant l'ouvrage :

- les membrures funiculaires où la quantité d'acier est juste suffisante pour reprendre les forces axiales en traction ;
- les colonnes de jonction entre les membrures où le ferraillage est juste technologique ;
- la membrure supérieure en T concentre à la fois toute la rigidité flexionnelle et la majeure partie de l'acier de ferraillage.⁵

Faisant usage de simulations numériques pour évaluer la qualité de la réponse structurale, on montre qu'il y a un comportement identique à celui qui est prévu par la simulation en statique graphique et que le comportement en flexion est cohérent avec celui de structures raidies. Ceci correspond effectivement à la méthode employée pour concevoir cette structure, qui n'est autre qu'une variation complexe d'arcs raidis intégrant les principes des dalles-champignons !

Les corrections à appliquer à la géométrie pour s'assurer que toute force de flexion a été éliminée montrent un maximum de 5 cm, correspondant à 1 mm sur l'épure tracée au 1/20^{ème}, ce qui est géométriquement impraticable.⁵

Ce qui signifie que la conception de cette structure peut être considérée comme parfaite ... même basée sur un schéma statique qui n'est pas parfaitement équilibré.

CONCLUSION

En résumé, notre propos a passé en revue l'approche de Maillart pour aborder la question structurale : une réflexion de fond préalable sur les comportements structuraux adéquats, le statut des matériaux et des parties composant l'ouvrage, l'emploi de la statique graphique pour organiser les trajectoires d'effort, obtenir les géométries des ouvrages et étudier l'amplitude des forces le long de ces trajectoires.

On peut aussi relever le parallèle des méthodes employées par Maillart pour gérer l'équilibre structural à l'échelle de la structure avec la méthode qui est employée aujourd'hui en conception plastique pour gérer les zones où les hypothèses de Bernoulli ne s'appliquent pas : la méthode des bielles et tirants^{17,18}.

Nous avons conclu que l'approche de Maillart est en premier ressort une approche simplificatrice portée par la graphique. Pour Maillart, le béton est employé comme un matériau destiné à être comprimé. C'est grâce à cette conception qu'une grande efficacité structurale est atteinte, avec peu de fissuration et dès lors un endommagement réduit au cours du temps. En d'autres termes, une conception rationnelle et durable.

RÉFÉRENCES

J.-M. Crémer - La passerelle Mativa à Liège - Patrimoine exceptionnel. 1905

- ¹ Crédit photographique : Jean-Luc Deru / Daylight.
- ² Fonds Hennebique. CNAM/SIAF/CAPA/Archives d'architecture du 20^{ème} siècle. BAH24190409868.
- ³ Carte postale identique sur www.delcampe.be prix 3 €.
- ⁴ (1905), Les ponts Hennebique, les 3 jumeaux, *Le Béton Armé*, 85.
- ⁵ Demonceau, D. (2010). *Analyse critique et comparative d'un ouvrage historique: le Pont Mativa*. Travail de fin d'études (Master) - Sciences Appliquées, Construction à finalité approfondie - Université de Liège.

D. Zastavni - La conception des ouvrages en béton armé au début du 20^{ème} siècle : approches visionnaires de Robert Maillart. 1872-1940

- ¹ Rigassi, C. ; Billington, D. (1988). Publikationen zu Robert Maillarts Leben und Werk. *Handschriften und Autographen der ETH-Bibliothek: Robert Maillart (1872-1940) Ingenieur*. Zurich.
- ² Bill, M. (1955). *Robert Maillart, Ponts et Constructions*. Girsberger
- ³ Billington, D. P. (1979). *Robert Maillart's Bridges, The Art of Engineering*. Princeton University Press.
- ⁴ Culmann, K. (1866). *Die graphische Statik*. Zürich: Meyer und Zeller.
- ⁵ Zastavni, D. (2007). *La Conception chez Robert Maillart: Morphogenèse des Structures Architecturales (PhD dissertation)*. Louvain-la-Neuve : UCL.
- ⁶ Simonnet, C. (2005). *Le béton, histoire d'un matériau*. Marseille: Éditions Parenthèses.
- ⁷ GUIDOT, R. (1997). *Béton armé. L'art de l'ingénieur, Constructeur, entrepreneur, inventeur*. Paris.
- ⁸ Chambre syndicale des constructeurs en ciment armé de France et de l'Union française (1949). 1849-1949, Cent ans de béton armé. *Revue Travaux* n°194bis : 34-41.
- ⁹ Billington, D. P. (1997). *Robert Maillart, Builder, Designer, and Artist*. Cambridge University Press.
- ¹⁰ Heyman, J. (1996). *Structural Analysis, A Historical Approach*. Cambridge University Press.
- ¹¹ Zastavni, D. (2011). Robert Maillart's Innovative use of Concrete. *DOCOMOMO Journal*, 45(2): 12-21.
- ¹² Heyman, J. (1995). *The Stone Skeleton: Structural Engineering of Masonry Architecture*. Cambridge University Press.
- ¹³ Ochsendorf, J. (2005). Practice before Theory: The Use of the Lower Bound Theorem in Structural Design from 1850-1950. *Essays: The History of the Theory of Structures*. Madrid: 353-366.
- ¹⁴ Ritter, W. (1897). Versteifungsfachwerke bei Bogen- und Hängebrücken. *Zeitschrift für Bauwesen*, 27: 187-207.
- ¹⁵ Zastavni, D. (2009). What was truly innovative about Maillart's designs using reinforced concrete? *Proceedings of the Third International Congress on Construction History*. Cottbus.
- ¹⁶ Zastavni, D. (2008). The structural design of Maillart's Chiasso Shed (1924): a graphic procedure. *Structural Engineering International*, 18(3): 247-252.

- ¹⁷ Schlaich, J. & Schäfer, K. (1991). Design and detailing of structural concrete using strut-and-tie models. *The Structural Engineer*, 69 (6): 113-125.
- ¹⁸ Schlaich, J., Schäfer, K. & Jennewein, M. (1987). Toward a Consistent Design of Structural Concrete. *PCI Journal*, Special report, May-June 1987: 74-150.
- ¹⁹ Losinger and Co., Bern in Billington, D.P. (1997). *Robert Maillart, Builder, Designer, and Artist*. Cambridge University Press, p. 180.
- ²⁰ J. Solca (1914), *Schweizerische Bauzeitung* 63 (24), fig. 3.
- ²¹ Crédit photographique : D. Zastavni, photo de 2010.
- ^{22, 23, 24, 25} Crédits photographiques : D. Zastavni
- ²⁶ Crédit photographique : D. Zastavni, photo de 2010.
- ²⁷ Crédit photographique : D. Zastavni

J.-M. Crémer - Apports de la précontrainte dans l'architecture des ponts

- ¹ Crédit photographique : efreyssinet-association.com
- ² Mathivat J. et Virlogeux M. (1979). *Les grands ouvrages en béton précontraint*. AFPC, Bulletin technique.
- ³ Crédit photographique : <http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Stolmabrua01.JPG>
- ^{4, 5} Crédits photographiques : Jean-Luc Deru / Daylight.
- ⁶ Crédit photographique : Jean-Marie Crémer.
- ^{7, 8} Crédits photographiques : Jean-Luc Deru / Daylight.
- ⁹ La Réunion. Guide Touristique île de la Réunion avec Mi-aime-a-ou.com
- ¹⁰ Frampton K. (1980). *Thames & Hudson, l'Architecture moderne, une histoire critique*.
- ¹¹ Mathivat J. (1978). *Construction en encorbellement des ponts en béton précontraint*. Paris : Eyrolles.
- ¹² Menn C. (1990). Birkhäuser Verlag, *Prestressed Concrete Bridges*, Basel-Boston-Berlin.

Ph. Demars - Points faibles et pathologies des ponts en béton précontraint

- ^{1, 2, 3} Crédits photographiques : SPW.

Y. Rammer - Remplacement de la précontrainte extérieure dans un pont en caisson

- ¹ Soete, A. (1964). Les ouvrages en béton précontraint aux chemins de fer. *Mémoires du CERES*, Liège.
- ² Pappaert, J.-M. (1960). Quelques constructions en béton précontraint exécutées en Belgique de 1959 à 1961. *Précontrainte*, n°16, pp. 59-104.
- ³ Crédit photographique : Yves Rammer
- ⁴ Crédit photographique : Pierre-Marie Dubois
- ⁵ Calgaro, J.-A. (1997). *Maintenance et réparation des ponts*. Paris : Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussée.
- ⁶ Dubois, P.-M. (2001). *Rapport relatif aux essais de mesure de précontrainte résiduelle du pont de Clabecq, annexe n°3* Note de calcul établie par ir R. Dekeyser. Rapport confidentiel.
- ⁷ Magnel, G. (1953). *Le béton précontraint*. 3^{ème} édition. Gand : Éd. Fecheyr

P.-M. Dubois - Précontrainte et corrosion, que faire ?

- ^{1, 2, 3} Crédits photographiques : Pierre-Marie Dubois
- ⁴ Dubois, P.-M., Michaux, D., (2008). Technique innovante : traitement des câbles de précontrainte par injection d'un inhibiteur de corrosion, *Ouvrages d'art (SETRA)*, N°59, novembre 2008, pp. 8-18.

HISTOIRES DE BÉTON ARMÉ

PATRIMOINE, DURABILITÉ ET INNOVATIONS





Une publication FEBELCEM en collaboration
avec FABI Comité Patrimoine et Histoire

FEBELCEM

Fédération de l'Industrie Cimentière Belge
Boulevard du Souverain 68 - 1170 Bruxelles
tél. 02 645 52 11 - fax 02 640 06 70
www.febelcem.be - info@febelcem.be

FABI

Fédération Royale d'Associations Belges
d'Ingénieurs Civils, d'Ingénieurs Agronomes
et de Bioingénieurs
Rue Hobbema 2 - 1000 Bruxelles
tél. 02 734 75 10 - fax 02 734 53 15
www.fabi.be - fabi@fabi.be

Ed. resp. : A. Jasienski

infobeton.be

Dans cet ouvrage coédité par FEBELCEM et le Comité Patrimoine et Histoire de la FABI, une trentaine de spécialistes éminents, ingénieurs, architectes, historiens, professeurs, praticiens, nous font parcourir plus d'un siècle d'histoire du béton armé et précontraint.

Des articles généraux nous parlent des découvertes et de l'évolution des techniques, des articles d'applications nous présentent une trentaine d'exemples, principalement en Belgique, mais également dans le monde, du début du 20^{ème} siècle à nos jours.

En introduction à cet ouvrage, une liste chronologique d'ouvrages marquants de l'histoire du béton armé et précontraint donne des repères au lecteur et chacun des sept chapitres qui le composent se termine par une liste de références.

Un glossaire reprenant les termes essentiels du béton armé et précontraint complète cet ouvrage destiné tant aux spécialistes qu'à tous ceux qui sont intéressés par ce matériau incontournable de la construction depuis le début du 20^{ème} siècle.

