

Historique du béton précontraint

L'apport décisif d'Eugène Freyssinet

La notion de précontrainte, sans le vocable, est très vieille. Elle est antérieure au béton. Le cerclage à chaud des tonneaux et des roues en bois, la stabilisation de vieilles demeures, grâce à des barres en fer terminées par des « S » retenant des pignons qui prenaient du ventre, sont des techniques anciennes.

Dès que des théoriciens se sont penchés sur le béton armé naissant, à la fin du XIX^e siècle, on a eu également l'idée d'enrober les fers à béton après qu'ils sont déjà tendus, si les conditions s'y prêtaient.

L'essor des constructions métalliques fut accompagné par les progrès des calculs élastiques. Bien que la plasticité en traction de l'acier fût connue, cette plasticité survenait après une phase bien élastique qui semblait être le comportement fondamental de tous les matériaux solides et au-delà duquel il aurait été trop hasardeux de s'aventurer.

Le béton armé a été le premier matériau composite moderne ; c'est même à son ancêtre, vers 1850, le ciment armé du jardinier Monier, que revient le mieux cette appellation. Faire des bétons très résistants en compression n'était pas au centre des préoccupations à cette époque, la très faible résistance à la traction militait pour des contraintes également modérées dans les armatures, de l'ordre de 80 MPa, soit un allongement de 0,4 mm par mètre.

Ce béton armé était en sorte une maçonnerie améliorée, à laquelle on pouvait donner les formes souhaitées.

Les premiers ouvrages d'Eugène Freyssinet jeune ingénieur « ordinaire » à Moulins, sont de ce type.

Ses préoccupations d'économie des matériaux (fussent-ils moins nobles que l'acier) et de durabilité, son savoir-faire artisanal en permanence alimenté par une observation minutieuse, lui ont fait découvrir des lois de déformation du béton beaucoup plus complexes que celles de l'élasticité, ainsi que le rôle fondamental joué par l'eau en excès par rapport à celle nécessaire à l'hydratation du ciment. Ses études théoriques sur ce sujet, plus tardives, lorsqu'il s'est lancé dans l'aventure du béton précontraint, au-delà de 1930, anticipaient de plus de cinquante ans les études accompagnant les bétons à hautes performances (BHP), qu'Eugène Freyssinet savait alors faire sans le recours à une chimie fine des adjuvants qui n'existait pas.

La maîtrise par Eugène Freyssinet de la qualité du béton, aussi bien en termes de résistance que de compacité, permettant la bonne protection des armatures, est sans doute à l'origine d'une assurance qu'il avait transmise à ses collaborateurs, à savoir qu'un bon béton assure automatiquement la conservation des armatures si on a su empêcher sa fissuration. La précontrainte permettait cela.

Cette assurance d'Eugène Freyssinet n'est pas démentie par les ouvrages dont il s'est occupé suffisamment lui-même pour que la conception et la qualité de la réalisation n'aient pas été altérées par un manque de rigueur ou de compétences dans la réalisation des détails.

Quand Eugène Freyssinet a commencé sa carrière d'ingénieur des Ponts et Chaussées en 1905, il n'y avait pas encore, en France, de règlement du béton armé. Le premier a été publié en 1906. La théorie du béton armé était en train de se bâtir. Appliquant avant la lettre le principe de précaution, peu de responsables osaient s'engager avec ce matériau nouveau.

Cela fut une vraie chance pour Eugène Freyssinet qu'il y ait eu, à Moulins, un entrepreneur politiquement puissant, François Mercier, qui de plus saisisse aussi vite l'intérêt économique du nouveau matériau, et la compétence du tout jeune Eugène Freyssinet. On connaît la suite...

On pense moins au rôle joué par les deux guerres dans le développement du béton armé et celui du béton précontraint. On pense peu également que c'est une catastrophe, celle-là bien mineure, comparée aux guerres, le risque d'effondrement de la gare transatlantique au Havre, en 1934, qui a conféré à Eugène Freyssinet le prestige et les moyens matériels lui permettant de mettre au point ses inventions.

La Première Guerre mondiale a interrompu les recherches d'Eugène Freyssinet sur les déformations du béton. Mais les énormes besoins de la guerre et le souci de réserver l'acier pour les armements ont fait qu'Eugène Freyssinet est devenu

un très grand constructeur de bâtiments industriels en béton armé, avec des couvertures en voûtes minces, vraiment très minces, préfigurant les hangars à dirigeables d'Orly, malheureusement détruits pendant la Seconde Guerre mondiale.

Eugène Freyssinet n'a pas eu, pendant cette période, le loisir de développer les études qui furent, ensuite, entreprises sur le béton. Mais il allait, en une dizaine d'années, acquérir les connaissances aboutissant au premier brevet de 1928, définissant parfaitement les produits précontraints par adhérence. Tout était dit dans ce brevet, un matériau nouveau était né !

À l'étranger, c'est en Allemagne qu'on a tout de suite suivi et participé aux développements de ce matériau nouveau, avec, en particulier, une première application industrielle pour les fortifications du mur de l'Atlantique, en 1943.

La crise de 1929 avait, entre-temps, fait échouer un développement en vue de la fabrication de poteaux de ligne électrique, échec qui avait ruiné Eugène Freyssinet. L'histoire a bien décrit l'intervention d'Eugène Freyssinet pour sauver la gare transatlantique du Havre, qui allait accueillir le *Normandie*.

Les énormes besoins de la reconstruction ont facilité l'essor de la précontrainte, concept fort simple, montrant les économies de matière (ciments et acier) que celle-ci permettait. Les « bons matières » permettant l'achat de ces matériaux de base n'ont disparu en France qu'une dizaine d'années après la fin de la guerre. Aussi, est-ce avec un certain retard qu'on a également mis en œuvre de la précontrainte sur des dalles épaisses, et non plus seulement sur des profils « optimisés » en vue de leur moindre consommation de matière.

Ce contexte permet également d'expliquer l'extrême finesse des âmes, des hourdis entre poutres de la plupart des ouvrages construits en France jusqu'en 1960. Les poutres étaient très rapprochées et bien entretoisées. Le risque de rupture brutale sans aucun désordre préalable visible est limité sur ces ouvrages, pour autant qu'ils fassent l'objet de visites périodiques par un personnel sachant ce qu'il faut regarder.

Les ponts sur la Marne construits dans l'immédiat après-guerre témoignent par leur qualité et leur légèreté d'une maîtrise exceptionnelle, et des soucis d'économie de matières de l'époque.

Les optimums économiques changent donc les formes et les matériaux. Mais, ce qui devrait également survivre, c'est la recherche de la vraie qualité qui se voit dans le détail de ses réalisations et n'a que de bien maigres rapports avec le respect des normes...

Citons à la gloire d'Eugène Freyssinet, jeune constructeur de ponts en béton armé, le pont Boutiron sur l'Allier (Fig. 1.1), construit en 1911 et plus tard, le pont de

Luzancy (1942) (Fig. 1.2) et les cinq ponts sur la Marne près de Meaux, ancêtres des kilomètres de ponts précontraints réalisés à partir de voussoirs préfabriqués. L'historique des ponts en béton précontraint en France et de leur pathologie par corrosion quand il y en a eu, ne peut pas se comprendre sans ce rappel, et du fait qu'on n'utilisait guère, autrefois, de sels de déverglaçage.



Figure 1.1. Le pont Boutiron sur l'Allier (IFSTTAR).



Figure 1.2. Le pont de Luzancy sur la Marne (B. Godart).

C'est ainsi que mettre en œuvre une étanchéité sur les ponts en béton précontraint paraissait superflue jusqu'en 1960, bien que le mode d'exécution des ponts à poutres multiples sous chaussées introduisît des zones préférentielles de cheminement d'eau : reprise de bétonnage des bandes de hourdis entre poutres, « poches » de réservation des câbles relevés en extrados, abouts des poutres soumis au ruissellement au droit des joints de chaussée. Ces détails d'exécution, qui auraient dû être correctement traités, étaient laissés à l'initiative des exécutants...

Ce n'est qu'en 1966 qu'une circulaire imposa la présence d'une chape d'étanchéité sur les ponts précontraints, même s'il y avait une précontrainte transversale.

Mais le concept de la précontrainte, bi-directionnel dans ce type de tablier, semblait suffisant : un bon béton non fissuré, parce que précontraint, était réputé étanche. On a même disposé dans certains ouvrages des câbles non gainés en rainures, ultérieurement remplies de mortier, sans faire ensuite d'étanchéité. Cela peut être exceptionnellement durable, dans certaines conditions.

Nous en avons eu la surprise de retrouver cette technique, utilisée par Eugène Freyssinet dès 1910, pour le tirant de l'arche d'essai du Veurdre (Fig. 1.3), dont les aciers tendus, protégés de la sorte, ont été retrouvés à peine corrodés quatre-vingt-dix ans plus tard ! Dans ce cas particulier, un jardin à Moulins, pas de fatigue des matériaux dans un environnement naturel, l'eau de pluie pouvant ruisseler selon les pentes sans s'infiltrer dans la poutre.

Tous les aciers durs ne sont pas également sensibles à la corrosion. Sur le marché français nous, concepteurs d'ouvrages, avons dû être bien conseillés par les fabricants d'acier, qui nous ont épargné des déboires connus en d'autres pays. En constat simplifié, les aciers laminés sous forme de fils (enroulables) traités pour avoir une résistance garantie de 1 400 MPa et une limite élastique de 1 200 MPa n'ont pas donné d'ennuis spécifiques, tandis qu'il y a eu beaucoup de problèmes avec des traitements permettant d'obtenir 200 MPa de plus.



Figure 1.3. Arche d'essai du Veurdre (Freyssinet).

Noter l'ouverture d'une fenêtre dans le tirant pour examiner l'état de la précontrainte.

Ce sont des fils (\varnothing 5,7) de la 1^{re} catégorie qui ont été essentiellement utilisés en France jusqu'en 1960 (Freyssinet, BBR), tandis que l'entreprise GTM avait introduit des câbles à torons tréfilés dès 1950. Les aciers tréfilés permettent d'obtenir des résistances d'autant plus grandes que les diamètres sont petits. Les petits diamètres sont utilisés sous forme de torons, en général à 7 fils pour la post-tension. L'usage de petits torons, et de torsades de 3 ou 7 fils, s'était répandu dès les années 1950 pour la préfabrication dite à « fils adhérents ».

Le développement de ces produits en post-tension date des années 1960 ; Eugène Freyssinet, mort en 1962, n'a donc pas connu ces développements.

L'écrouissage accompagnant le tréfilage est bénéfique pour la résistance à la corrosion. Il faut toutefois partir d'un fil laminé sain et ne pas avoir épuisé la ductilité naturelle de l'acier pour éviter des ruptures fragiles dès la moindre « piqûre de corrosion », sur armatures fortement tendues (en permanence, après pertes diverses, à 60 % environ de la résistance à rupture).

Eugène Freyssinet n'a pas utilisé de torons pour faire de la précontrainte « post-tendue ». C'est que l'ancrage génial qu'il avait inventé en 1939, le petit cône en béton, n'était pas fait pour eux. On a bien essayé d'ancrer des torons, un peu avant la mort d'Eugène Freyssinet, mais la nature même des torons (forme et dureté superficielle) était incompatible avec l'ancrage par frottement des torons sur une faible longueur entre deux surfaces en béton. On a alors fabriqué des ancrages en acier à 12 torons déviés autour d'un cône mâle en position axiale. Cet ancrage, qui n'était pas un optimum technico-économique, a été progressivement abandonné au profit de ce qui est devenu le standard international : les ancrages multi-torons à clavettes tronconiques se bloquant dans autant de trous individuels qu'il y a de torons.

Entre 1970 et 1980, les anciens systèmes avec cônes d'ancrage en béton pour les fils, et avec fils « boutonnés » (système BBR - Boussiron) ont perduré, ainsi qu'un autre système à fils « aplatis » nervurés (sigma ovale). Ce fil avait des qualités spécifiques pour la préfabrication (très bonne adhérence). Par contre, de par sa forme, il générait un frottement très important et, s'agissant d'acier laminé avec des options pas toujours heureuses en composition et traitement thermique, il présentait une fragilité à la corrosion sous tension.

La post-tension s'est développée à partir de faisceaux de torons groupés dans une même gaine avec des torons enfilés dans celle-ci après bétonnage ; cette méthode, introduite sur les enceintes nucléaires vers 1970, est quasi généralisée maintenant, car elle est la plus fiable techniquement et la plus économique en main-d'œuvre. L'enfilage après bétonnage évite la période d'attente sur chantier de câbles posés gainés, protection trop sommaire vis-à-vis des intempéries, tandis qu'au bétonnage des entrées de laitance, par défaut d'étanchéité des gaines, compromettent une

bonne injection ultérieure et augmentent de façon aléatoire le frottement. Il a fallu que le gainage des câbles soit fait de façon suffisamment rigoureuse pour permettre à coup sûr l'enfilage après bétonnage. Et, ce faisant, un grand pas a été fait quant à la qualité : crédibilité des tensions calculées et possibilité de bien injecter.

Cette évolution technologique accompagna celle de la taille des câbles.

Le « cône béton » de 1939 ancrant 12 fils \varnothing 5 mm ; on en escomptait un effort permanent de 20 T, à peine plus que le permet maintenant un seul toron à 7 fils de 5 mm. Ces 12 fils étaient disposés dans une gaine d'à peine 30 mm de diamètre, en feuillard très mince, les fils étant groupés autour d'un petit ressort très étiré, destiné à maintenir un canal central pour l'injection d'un coulis de ciment.

Dans une toute première version, la gaine était remplacée par un guipage en papier, et l'injection était réalisée par un « produit noir » de protection, mis en place à la fabrication du câble, ce dernier étant disposé dans le ferrailage, avant bétonnage, comme on le fait maintenant avec des torons « gainés-graissés ». Entre l'idée et la bonne réalisation d'abord aux États-Unis, il s'est écoulé plus de vingt ans...

Très peu d'ouvrages ont été exécutés, avant 1948, avec cette technique. En reste-t-il en service ?

En revanche, ils sont encore nombreux, ancêtres des tabliers baptisés « VIPP » dans les années 1960, avec des câbles à 12 fils de 7 ou 8 mm, remplaçant les \varnothing 5 mm du système Freyssinet et, pour le système à fils boutonnés BBR essentiellement des \varnothing 7, jusqu'à 54 fils. Le boutonnage des fils impose une coupe à longueur et un calage. Il se prête mal à l'enfilage ultérieur des câbles. Aussi a-t-il été progressivement abandonné avec la généralisation de l'enfilage.

Eugène Freyssinet n'utilisait pas de barres pour la précontrainte ; cette utilisation est d'origine allemande. Le handicap des barres, quant à leur rigidité et à leur faible longueur, a été astucieusement valorisé avec les constructions en encorbellement coulées en place : le filetage facile à faire sur les barres permet leur raboutage indispensable à cause des longueurs limitées de fabrication. Il n'y a pas en France d'ouvrages de ce type.

La première entreprise française à s'engager sur le même créneau d'encorbellement coulé en place fut GTM, en 1955. Elle l'a fait avec des câbles toronnés, enfilés comme cela s'impose dans ce type de construction après bétonnage – câbles graissés pour faciliter l'enfilage et réduire les frottements. Il s'agissait d'aciers tréfilés, de bonne qualité métallurgique. Il n'y a pas eu, du fait de l'utilisation de ces aciers, de pathologie spécifique.

Ces rappels ont pour but de faciliter l'orientation des analyses à faire sur la pathologie potentielle ou avérée des ouvrages anciens.

L'aspect « calcul » est d'autant moins en cause que les ouvrages sont plus vieux, car un défaut significatif n'attend pas des décennies pour être détecté. Sont toutefois classés sous cette rubrique les aspects récurrents suivants :

- la prévision des déformations n'est pas toujours bonne, en dépit de programmes de calcul de plus en plus sophistiqués. Eugène Freyssinet a été le premier à attirer l'attention sur les déformations différées du béton, retrait, fluage, mais tout se passe comme s'il y avait une tendance inflationniste pour ces déformations ! Notre explication tient en l'évolution permanente des ciments et des bétons, privilégiant des résistances de plus en plus élevées au tout jeune âge, et un manque de recul concernant les déformations à long terme. Le temps « réel » n'est plus pris en compte, au profit d'un temps équivalent fonction de la température. Jusqu'où cela est-il valable, au tout jeune âge, pour les déformations ?
- les contraintes d'origine thermique : elles pouvaient être négligées pour les poutres dites isostatiques, sur lesquelles ont été formés quantité de « jeunes ingénieurs » des années 1950. La mauvaise habitude prise a fait confondre déformations d'ensemble, qu'on se devait de libérer pour permettre la précontrainte, et déformations par gradient thermique, lesquelles se manifestent dès qu'il y a continuité, avec des faces inégalement exposées thermiquement.

Bien que le livre d'Yves Guyon sur le béton précontraint faisait état des phénomènes de gradient thermique et de fluage dès 1951, ce n'est qu'en 1975 que la circulaire « Darpas » a introduit ce gradient thermique dans les sollicitations de calcul, sollicitation bien réelle et du même ordre de grandeur que celle due aux charges roulantes.

À notre connaissance, il n'y a plus de pathologie grossière en ouvrage d'art, ayant pour cause ces déformations imposées « parasites », en ce sens qu'elles n'étaient pas prises en compte dès la conception (retrait, fluage, thermique).

Par contre, cette pathologie est chronique en centres commerciaux et en parkings, couvrant de grandes surfaces, faute d'analyse d'ensemble de structures voisines, découpées un peu au hasard par des joints de dilatation, avec des différences thermiques selon les niveaux et les périodes de l'année (ventilation dans les parkings). L'utilisation de produits préfabriqués à fils adhérents concentre en ces structures les désordres dans des nœuds mal ferrailés et selon des lignes de joints se créant par fissuration large, corrigeant ou complétant les joints réalisés à la construction.