

# L'arche d'essais du pont du Veurdre, un ouvrage précurseur d'Eugène Freyssinet

L'arche d'essais du pont du Veurdre ayant été inscrite le 1<sup>er</sup> octobre 2021 à l'inventaire des Monuments Historiques, l'association Eugène Freyssinet a jugé utile de préciser les raisons et les circonstances de la construction à Moulins (Nièvre), en 1908, de cette arche éprouvette, et de rendre hommage à son concepteur qui, à cette occasion et pour assurer l'immobilité des culées de l'arche, a réalisé le premier tirant-buton en béton précontraint au monde. Longtemps ignorée dans le monde des constructeurs en béton, cet ouvrage mineur dans l'immense œuvre de Freyssinet est à l'origine de toute la réflexion qui l'a conduit à mettre en évidence le fluage du béton, de voler de records en records pour ses réalisations en béton armé, et de maîtriser toutes les conditions nécessaires au développement de son invention majeure, la précontrainte du béton.



État actuel de l'Arche récemment classée en 2021 © Association Freyssinet

## L'origine de l'ouvrage

Le premier contact d'Eugène Freyssinet avec le béton, c'était en 1903. Alors élève de l'ENPC (École Nationale des Ponts et Chaussées), il assistait avec son professeur Charles Rabut (1852-1925) à une visite du chantier de construction des consoles en béton armé pour l'élargissement de la rue de Rome à Paris, au-dessus des voies ferrées de la gare Saint-Lazare. La méthode de construction imposait un coulage du béton en plusieurs phases, ce qui permettait à ce matériau, utilisé mais encore mal connu, d'effectuer une partie de son « retrait endogène » et ainsi en limiter la fissuration. Pour contrer ce phénomène gênant, les précurseurs de Freyssinet placèrent des barres d'acier dans le moule coffrant dans lequel on coulait le béton frais, créant alors le « béton armé ». Le remède n'était pas complètement efficace et Freyssinet prétendit très tôt qu'il s'agissait d'un « mariage contre nature » ! Sa première réaction, fruit de son sens pratique hérité des artisans qu'il côtoyait au moulin de sa grand-mère pendant ses vacances à Objat fut la suivante : puisque le béton se fissure lors de son séchage, si on l'installe dans une structure dont le cheminement des efforts structurels maintient une compression naturelle, les fissures ne s'ouvriront pas. Et cette structure, bien connue depuis les Romains, c'est « l'arc ou l'arche ». Et dès 1907, le jeune « ingénieur ordinaire » des Ponts et Chaussées, en poste à Moulins depuis juillet 1905 après s'être fait la main en faisant réaliser de petits ponts en béton remplaçant des passages à gués sur les chemins de campagne, fait édifier un pont en arc de 26 m de portée à Prairéal-sur-Besbre (Allier). Cet ouvrage, aux dimensions modestes, est cependant célèbre car Freyssinet y appliqua, pour le « décentrement » de l'arc, une poussée par vérins dis-

posés à la clé de l'ouvrage, une première au monde. Nul doute que cette première application d'un effort de compression mécanique sur deux ½ arcs de 13 m leur imposant un raccourcissement instantané (et certainement différé ?), mit dans la tête de cet observateur avisé du comportement des matériaux des doutes à l'égard de la récente « Circulaire Interministérielle du 20 octobre 1906, concernant les instructions relatives à l'emploi du béton armé » qui, par hypothèse, considérait le matériau béton « élastique », au même titre que le matériau acier.

Ce sont ses doutes qui sont en partie à l'origine de l'arche d'essais du Pont du Veurdre.

## La construction des trois ponts sur l'Allier, le Veurdre, Boutiron, Chatel-de-Neuvre

C'est une suite un peu longue d'événements sans lesquels on ne peut pas mesurer l'importance de cet ouvrage pour la connaissance du matériau « béton », son comportement « élastoplastique », son raccourcissement lors du séchage le « retrait endogène », son raccourcissement différé dans le temps lorsqu'il est comprimé, le « fluage ».

Freyssinet, conscient de la nécessité du remplacement d'un pont suspendu usagé et trop étroit sur l'Allier, en aval de Vichy entre les villages de Charmeil et de Boutiron, avait dessiné un projet de remplacement en béton comprenant trois travées de près de 70 m de portée chacune formées d'arcs très surbaissés (1/15 environ) à 3 articulations (obligation réglementaire). Il en avait affiché le plan dans son bureau. Or, un entrepreneur important de la région, François Mercier, notable du Bourbonnais proche de Clemenceau, vint le trouver pour contester fermement le refus d'approbation de Freyssinet de

passages à niveau conçus par son entreprise pour des lignes de chemin de fer à voie étroite. À « Mes projets sont conformes au cahier des charges ! », Freyssinet répond : « certes, mais on peut faire mieux pour moins cher ! ». La raison l'emporta, et ils devinrent « les meilleurs amis du monde ».

Lors d'une autre visite, Mercier découvrant, affiché, le projet du pont Boutiron, Freyssinet explique que ce pont n'a aucune chance d'être construit, non par manque de crédits mais aussi parce qu'il est trop original. Après un moment de réflexion Mercier déclare : « Ce projet me plaît et je veux que vous l'exécutiez en pleine liberté et sous votre responsabilité. C'est facile à arranger. J'offre au département la reconstruction de ces trois ponts (pour le prix du seul projet de l'administration pour le Veurdre / ndlr), Boutiron, Châtel-de-Neuvre et le Veurdre, selon votre projet dont j'assume responsabilité, études et exécution : ... le département ne peut refuser une telle offre<sup>1</sup> ».

À 28 ans, Freyssinet se voit chargé de cette énorme responsabilité. Il fait face, mais c'est là que reviennent ses doutes sur les véritables propriétés mécaniques du matériau béton, qu'il n'a jamais jusqu'alors éprouvées totalement ; « avec l'accord de Mercier, je jugeai nécessaire de consentir à la dépense d'une arche d'essai importante. Notre projet posait plusieurs problèmes, qui exigeaient un contrôle expérimental préalable des solutions que j'entendais leur donner » ... « Le décollement des voûtes et du cintre, lors de la création de la poussée dans les voûtes, posait maints problèmes, et je voulais essayer le système à une échelle suffisante. Je tenais aussi à voir dans sa réalité, exécutée avec mêmes armatures et même béton, une voûte de dimensions et rayon moyen comparables à ceux des trois voûtes que je me préparais à mettre en équilibre sur mes piles. J'avais à supputer des déformations aux

causes diverses, dont je ne pouvais connaître l'ordre de grandeur que par des mesures faites sur une arche réelle<sup>2</sup> ». C'est ainsi que naissait l'Arche d'Essai du Pont du Veurdre.

## La description du projet

### Les caractéristiques essentielles

L'« arche éprouvette » possède une portée de 50 m très surbaissée (1/25) pour accroître sa poussée et solliciter le plus possible ce matériau béton dont il veut éprouver les limites. L'estimation de la poussée, de l'ordre de 350 tonnes sans surcharge, devient un élément clé du projet car, pour mesurer la variation de la longueur de l'arche lors de son décentrement puis sous l'effet du séchage et du durcissement du béton, il faut que les culées sur lesquelles elle s'appuie soient « absolument » fixes. Or, « Mon terrain de fondation ne valait rien et, du seul point de vue des charges verticales, je dus le consolider par des pieux<sup>3</sup>. Pour réaliser l'immobilité des culées, Freyssinet décide de les réunir par une poutre de béton de 3 m de largeur et 0,5 m d'épaisseur, un tirant : « Le tirant de cette voûte était un prisme de béton traversé dans le sens de la longueur par 1200 aciers de 10 mm et non adhérents au béton... »<sup>4</sup>. Répartis dans 7 rigoles d'une largeur de 12 cm, les fils d'acier sont mis en tension 2 par 2 par une extrémité du tirant et assurent la permanence de la tension par un ancrage à clavette sur chaque paire de fils. « En 1908, je reliai par un tirant précontraint à près de 3000 tonnes ... les deux culées d'une arche d'essai<sup>5</sup> ». « Conçu en 1907 et construit au cours de l'été 1908, ce tirant est l'ancêtre de tous les ouvrages en béton précontraint<sup>6</sup> ». Ainsi structurée pour garantir l'immobilité de ses deux rotules d'appui, cette arche, destinée à mieux maîtriser des propriétés jusqu'alors

2. Ibid ci-dessus

3. « Cent ans de Béton armé » déjà cité.

4. Pierre Lebel, Jubilé de E. Freyssinet, « Travaux »

5. Chambre Syndicale Nationale des constructeurs en ciment armé et béton précontraint, à l'occasion des cérémonies en l'honneur d'Eugène Freyssinet à Paris le 18 octobre 1963.

6. « Cent ans de Béton armé » déjà cité.

1. « Cent ans de Béton armé », supplément de la revue « Travaux », n° 194 bis, Editions Science et Industrie, 1949.



Pont Albert Louppe à Brest © Association Freyssinet



Pont de Villeneuve-sur-Loir © Association Freyssinet



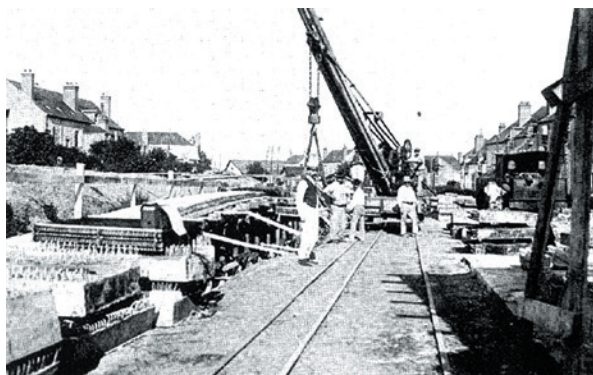


Figure 1 : Déchargement en cours d'éléments préfabriqués © Association Freyssinet

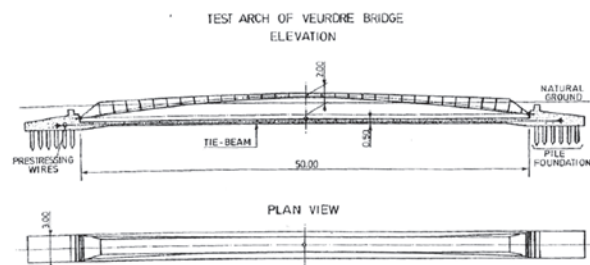


Figure 2 : Élévation de l'ouvrage sorti de terre © Association Freyssinet

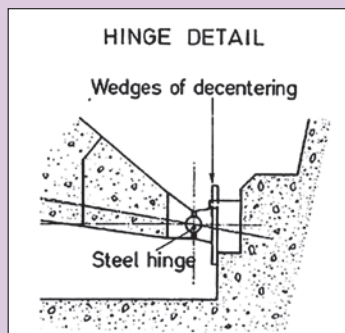


Figure 3 : Schéma de l'articulation © Association Freyssinet

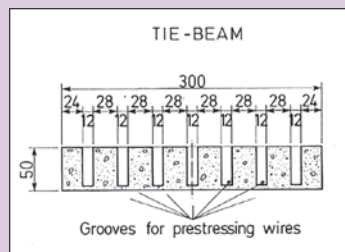


Figure 4 : Section droite du tirant avec les créneaux pour les fils © Association Freyssinet

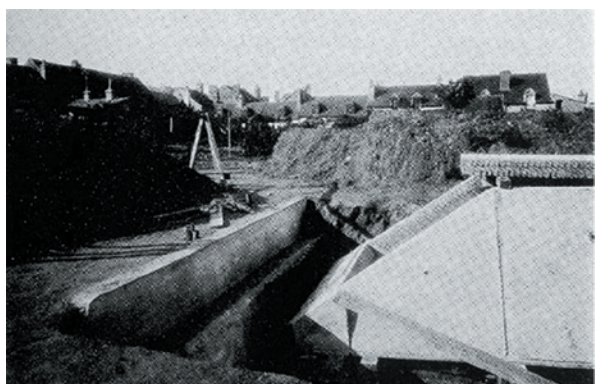


Figure 5 Photo d'époque d'une des extrémités de l'arche © Association Freyssinet

ignorées du matériau béton, a permis à Freyssinet, par la mesure précise de la descente de son point milieu à cause du vieillissement de son béton, d'obtenir des informations pour le réglage des voûtes du premier des trois ponts à réaliser, le pont du Veudre, dont le début de la construction était imminent. La guerre 14-18, malheureusement, a fait disparaître tous les dossiers regroupant les résultats des mesures. Mais Freyssinet en avait appris suffisamment pour continuer à construire des grandes voûtes (spécialement de ponts qui, pour la plupart, furent des records du monde de portée) pour beaucoup encore en service lorsqu'elles n'ont pas été détruites par la guerre 39-45 (Villeneuve-sur-Lot, pont Albert Louppe à Brest).

On ne doit cependant pas oublier que ce que l'on pourrait qualifier de « résultat collatéral » de la réalisation de cette « arche éprouvette », le tirant précontraint, complètement étranger à l'objectif initial de recherches, a un intérêt historique certain car, pour la première

fois au monde, il a permis de construire en béton un élément de 50 m de longueur garantissant la distance constante entre les deux appuis de l'arche sous l'effort de sa poussée. La technique mise en œuvre pour cela a sommeillée une vingtaine d'années avant que Freyssinet y revienne en déposant, en 1928, un brevet sur une nouvelle fabrication de pièces en béton qui, en 1930, prendra le nom de « précontrainte ». Cette technique « ouvre une ère nouvelle de l'art de construire »<sup>7</sup>, le « béton précontraint ». Ce rôle majeur de cette arche, pour la connaissance des véritables propriétés mécaniques du béton et l'évolution des méthodes de construction qu'elle a permise, justifient parfaitement son inscription au titre des monuments historiques<sup>8</sup>.

#### La construction de l'arche

Il est capital de savoir que, pour décrire la construction de l'arche, nous ne

disposons que des quelques écrits tardifs de Freyssinet cités plus haut et de six photos d'époque reproduites dans le livre de José A. Fernandez Ordonez<sup>9</sup>. Il a fallu que le Président de Freyssinet International de l'époque, en 1993, encourage une opération de découverte et expertise pour que l'on puisse connaître un peu mieux cet ouvrage, dans sa forme et ses matériaux constitutifs<sup>10</sup>.

Pressé par le temps pour obtenir des résultats nécessaires à la construction des ponts sur l'Allier, il fallut d'abord stabiliser le terrain alloué pour la construction. Freyssinet imagine alors une nouvelle méthode de construction qui permet de gagner du temps, la préfabrication de l'ouvrage par petits morceaux, cela sur un autre chantier installé en dehors du site de l'arche où la place manquait. Les éléments, chargés sur le train à voie étroite, sont amenés sur le site à portée de grue (Fig. 1). On observe aussi sur la photo que le tirant a déjà été réalisé ainsi que le coffrage circulaire au rayon de 156 m résultant de la flèche de 2 m et de la portée de 50 m. La découverte des deux culées et d'une partie du tirant a permis de donner une représentation assez fidèle à la réalité de l'arche et de son tirant (Fig. 2) ; pour ce dernier, cependant, il a été impossible de découvrir l'organisation du système d'ancrage des 1200 fils de 10 mm de diamètre, l'ensemble ayant été noyé dans le béton de culée destiné à configurer les articulations de l'arche à chacune des extrémités. Le dessin de l'élévation de l'ouvrage (Fig.2) est dressé « d'après nature ». On a pu donner une représentation de la section du tirant avec les 7 créneaux dans lesquels sont logés les fils enrobés de sable ; une couche de 3 cm de mortier obture les créneaux (Fig. 4). De même, on a pu représenter le principe des articulations aux naissances de l'arche (Fig. 3) avec les coins à faible pente participant à l'effort de décentrement ; mais il n'est pas apparu de façon évidente dans la masse de métal oxydé (Fig. 6) le système des rondelles Belle-

7. « Idées et Voies nouvelles » par E. Freyssinet, Science et Industrie n°1 janvier 1933

8. Arrêté N° 21-456 du 1<sup>er</sup> octobre 2021

9. Eugène Freyssinet, José A. Fernandez Ordonez et Freyssinet International Sociedad Cooperativa Industrial de Trabajo Asociado, Group 2c, Editions bilingue 1979

10. Rapport d'expertise Freyssinet International, Pierre Jartoux, 1994

ville évoqué par Freyssinet pour participer à l'effort de décentrement: «Je les remplaçai (les vérins impossibles à obtenir dans les délais exigés / ndlr), pour l'arche d'essai, par des coins d'acier enfoncés à la masse qui comprimaient chacun trois piles de rondelles Belleville placées en arrière des articulations, aux deux retombées. La somme des réactions élastiques de tous ces ressorts devait fournir la poussée directe»<sup>11</sup>. Freyssinet n'a pas non plus précisé dans ces écrits s'il s'est contenté d'observer le phénomène de déformations différées sous le seul effet des contraintes de poids propre de l'arche, ou s'il a effectué un chargement pour en accroître la valeur et l'accélérer.

#### Résultats de l'expertise de 1993 sur les matériaux de l'arche

Nous ne disposions à cette époque-là que des précieuses informations données par Freyssinet, d'abord en 1949 dans «Souvenirs», et en 1954 lors d'une conférence donnée à La Chambre Syndicale des Constructeurs en Ciment Armé. Tous les documents et résultats concernant l'arche disparaurent pendant la guerre 14-18: «Le terrain où était l'arche d'essai, mes notes et mon matériel furent remis aux militaires. Quand je revins, en 1919, je me trouvai devant un énorme dépôt de mâchefer. Mon travail des années antérieures à 1914 était anéanti»<sup>12</sup>.

Après les relevés de la géométrie qui ont permis d'établir les schémas ci-joints, on s'est intéressé aux matériaux: le béton, l'acier des fils du tirant et la précontrainte résiduelle qui permet toujours aujourd'hui de garantir la stabilité de l'arche sous l'effet des poussées de sa voûte.

#### Béton du tirant

Les parois de l'arche ne le permettant pas, on s'est contenté de prélèvements de carottes réalisées dans le tirant (diam. 143x260 mm). La résistance moyenne à la rupture était de 43,5 MPa (équivalent à 535 kg/cm<sup>2</sup>, ou 7 650 PSI). Au moment de la construction la résis-

tance devait être de l'ordre de 35 MPa, ce qui était à l'époque une performance et démontrait déjà la maîtrise de Freyssinet sur la qualité du béton. La porosité relevée (0,24% de reprise d'eau en 24h) est très faible, ce qui signifie à la fois une bonne formulation du mélange ciment-granulats et une excellente mise en place, sans vibration mécanique (il ne l'inventa qu'en 1917). L'absence de vide contribue aussi à la bonne résistance observée. L'analyse minéralogique en microscopie électronique a par ailleurs révélé une présence de chaux libre, preuve sans doute d'un dosage «généreux» en ciment. Du point de vue du vieillissement atmosphérique, l'épaisseur de la couche carbonatée est très faible, de l'ordre du mm, ce qui est une conséquence à la fois de la pureté de l'atmosphère de Moulins et de la faible perméabilité constatée.

#### Fils d'acier du tirant

Les caractéristiques mécaniques moyennes mesurées sur 7 échantillons sont les suivantes:

- effort de rupture: 48,75 kN (pratiquement 5 tonnes);
- contrainte de rupture (FR): 621 MPa;
- limite élastique (0,2 %) (Fe): 602 MPa;
- allongement de rupture: 5% environ;

Fe/FR = 0,96 (valeur très élevée, conséquence d'un intense vieillissement lié à la forte teneur en azote qui augmente la limite élastique).

Origine métallurgique: il s'agit d'un acier doux Thomas (C% 0,03) élaboré à partir de la «minette lorraine». La forte teneur en phosphore (64/1000%) et en arsenic (53/1000%) signent l'origine. Il s'agit d'un acier «effervescent» (non calmé), élaboré au convertisseur, coulé en lingot avant laminage.

La coupe transversale (Fig.8) fait apparaître deux zones nettement distinctes: à l'extérieur le «lard d'effervescence» constitué de fer pratiquement pur, le carbone ayant été transformé en CO en présence de l'oxygène du soufflage au convertisseur et chassé vers le cœur du lingot pendant le refroidissement



Figure 6 - Photo de l'articulation côté Est © P.Jartoux



Fig 7 Faisceau de fils non oxydés © P.Jartoux

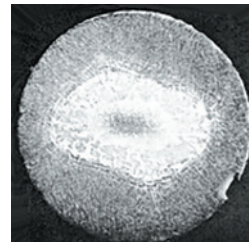


Fig 8 Coupe du fil Gr 4  
© Association Freyssinet

dans la lingotière, à l'intérieur le «carré d'effervescence» plus riche en carbone et en inclusions diverses. Le fer pur à l'extérieur et la forte teneur en phosphore sont à l'origine de la bonne résistance à la corrosion constatée à l'expertise (Fig.7).

Le fil machine diam. 11 mm issu du laminage a subi une passe d'écrouissage de 20% pour l'amener à diam. 10, faisant passer la résistance à la rupture de 400 MPa environ à 621 MPa.

11. «Cent ans de Béton armé» déjà cité.

12. Conférence «Naissance du béton précontraint et vues d'avenir» («Travaux», juin-août 1954)





En visite sur l'Arche, quelques fidèles et anciens collaborateurs de Freyssinet en septembre 2005

**Pierre Jartoux et Patrick Guiraud TP 81,  
membres de l'Association Eugène Freyssinet**

**Association Eugène Freyssinet :  
7 Bis rue de la Ferme – 91390 Morsang-sur-Orge  
www.efreyssinet-association.com  
email : eugene.freyssinet@orange.fr**

### Précontrainte résiduelle dans le tirant

Elle a été mesurée directement sur les fils en tension dans le tirant par la méthode dite « de l'arbalète » du LRPC (Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées) de Lille. C'est un procédé qui consiste à mesurer l'effort nécessaire pour imposer une déviation connue à un fil tendu. Une autre série de mesures a consisté à mesurer le rapprochement de deux repères du fil tendu lorsque l'on coupe ce fil (prélèvement d'échantillons d'expertises). La moyenne des résultats d'une cinquantaine de mesures a conduit à une valeur de contrainte résiduelle de 150 MPa, soit une force de tension résiduelle de 12 kN. Il en résulte un effort global de compression de ce tirant-butoin, provoqué par les 1200 fils de diam. 10 mm toujours tendus, de 14 400 kN (près de 1 500 tonnes).

La poussée de la voûte de l'arche d'essai, de l'ordre de 350 tonnes, est toujours parfaitement équilibrée et

donc cet ouvrage, récemment inscrit à l'inventaire des monuments historiques, aura, sauf cataclysme improbable, une pérennité garantie de plusieurs centaines d'années; un résultat paradoxal inattendu pour une « éprouvette d'essais » vouée à disparaître après production des résultats !

### Conclusion

Cet ouvrage, vieux d'un peu plus d'un siècle, reposant maintenant dans un terrain qui est devenu un potager, est en fait le symbole du génial constructeur de 29 ans que fut Eugène Freyssinet.

Cette arche, destinée à la connaissance des véritables propriétés mécaniques et rhéologiques du béton (matériau « élasto-plastique ») indispensables à son utilisation comme matériau de construction de structures, fut un outil de confrontation scientifique avec la Circulaire Ministérielle de 1906 définissant les règles pour construire en béton élaborées à partir d'un postulat purement théorique qui affirmait, sans aucune vérification pratique et au risque d'applications dangereuses, que le béton est un matériau « élastique » au même titre que l'acier.

La constance de Freyssinet dans ses affirmations, heureusement soutenues par l'entrepreneur François Mercier qui prit le risque de garantir la réalisation de ses projets, a permis de qualifier le béton comme véritable matériau de construction au même titre que l'acier ou la pierre, et d'initier le succès de développement qu'il a connu. En outre, résultat d'autant plus important qu'il était tout à fait inattendu, les conditions particulières d'installation de cette arche ont conduit Freyssinet à concevoir un tirant-butoin pré-comprimé par un ensemble de fils d'acier tendus, réalisant ainsi une disposition constructive inédite qui deviendra 22 ans plus tard le « béton précontraint ».

Saluons ici la pertinence du choix des autorités culturelles et administratives qui ont décidé son inscription à l'inventaire des monuments historiques. ■