

Hommage à Eugène FREYSSINET

12 octobre à Moulins et 13 octobre 2023 à Noyant d'Allier

Avertissement

N'ayant pas la certitude d'avoir pris contact avec tous les ayants-droits en matière photographique, nous remercions les éventuels oubliés de se faire connaître



la vie et l'œuvre d'Eugène FREYSSINET

1^{ère} partie : de sa naissance en 1879 jusqu'à 1929



Moulins – 12 octobre 2023



Sa maison natale
à Objat
(Corrèze)

Sa naissance en 1879 à Objat, en Corrèze

Le moulin de sa grand-mère à Objat



sa formation pratique au contact des ouvriers du Moulin...

« Je suis né constructeur... »

Eugène a 8 ans,
lorsque ses
parents quittent
la Corrèze
pour venir
s'installer
à Paris...



... école communale de la Rue des Ecluses
Saint Martin (Paris 10^{ème})

... lycée Chaptal, boulevard des
Batignolles (Paris 8^{ème})

... Ecole Polytechnique en 1899



L'ancienne Ecole Polytechnique
21 rue Descartes à Paris



En uniforme de polytechnicien
à 22 ans



Tout au long de ses études, durant ses séjours à Paris, assiduité au Conservatoire des Arts et Métiers où tout le passionné



... et dès qu'il est en vacances, c'est à Objat, au Moulin de sa Grand-mère qu'il va retrouver les artisans et les ouvriers qui travaillent au Moulin



Le 1^{er} octobre 1901, durant son passage à l'X, il fait son service militaire 7^{ème} Régiment du Génie, en Avignon



Au cours d'un exercice sur le Rhône

Il invente et met au point un « système de **trilles d'équipages** », qui permet à un ponton ou une barge de traverser un cours d'eau accroché à un câble en utilisant la force du courant.



Croquis joint au brevet

Principe de la « Traille d'équipage »
courant



Cette invention lui valut une lettre de félicitations du Ministre de la Guerre...



Exercice de traille

Ce système a souvent été utilisé par le Génie, depuis cette date, comme moyen de secours provisoire de remplacement en cas de destruction d'un pont.

En 1903, il intègre l'École des Ponts...

ses trois Maîtres à l'ENPC : Résal, Séjourné et Rabut

« Je leur dois la révélation, d'une part, des qualités et des défauts du béton armé, d'autre part un sentiment de la vie des contraintes dans les ouvrages, qu'ils possédaient à un très haut degré »

3 grandes idées maîtresses :

Béton → Compression

Cheminement des efforts

Maîtrise des Contraintes



L'ancienne École des Ponts et Chaussées,
rue des Saints Pères à Paris

C'est durant ces études à l'École des Ponts et Chaussées qu'il eut pour la première fois l'idée de « **pré-comprimer** » du béton, afin d'éviter qu'il ne fissure, au cours d'une visite du chantier des célèbres encorbellements de la rue de Rome, à Paris, avec son professeur Charles Rabut.

Arrivée d'Eugène Freyssinet en Bourbonnais





Propriétaires et gestionnaires entre 1824 et 1940

Type de voie	Propriétaire	Financier	Gestionnaire	Services
Routes nationales	État	État	État	Service des Pons et chaussées
Routes départementales	Département	Département		
Chemins de grande communication	Commune	Commune	Préfet et conseil général	Service vicinal Eugène Freyssinet
Chemins d'intérêt commun			sous la supervision	
Chemins vicinaux ordinaires			du Ministère de l'Intérieur	
Chemins ruraux				



Eugène FREYSSINET commence sa carrière dans des contextes bien particuliers à cette époque :

dans le domaine de la construction

découverte du ciment portland artificiel en 1817 par Louis VICAT (X1804)



découverte à partir de 1850 du béton armé (Jean Louis LAMBOT et Joseph MONIER) puis son développement à partir de 1875 (François HENNEBIQUE)

développement de la métallurgie et de la construction métallique avec son apogée vers 1885 avec Gustave EIFFEL (ECP 1855)

La construction en 1905



Une anomalie : le béton, comme la maçonnerie, est un matériau de construction qui ne résiste pas à la traction contrairement au bois et au métal (fer ou acier)

dans le domaine administratif et professionnel

manque de crédits

développement extraordinaire des transports routiers et ferroviaires

d'énormes besoins dans le domaine des équipements (routes et voies de chemins de fer)

En 1905 dans l'Allier

- **Déplacements** en train, à cheval, à pied ou en vélo. Les automobiles sont un objet de luxe
- La plupart des routes et tous les chemins sont en **terre battue**
- **Aucune signalisation** pour se diriger
- **Cartes au 1/50 000è**
- Pas de ponts en béton dans l'Allier en 1905
- Première réglementation : 1906
- Ouvrages habituels en maçonnerie ou métalliques
- **Pas ou peu d'argent** pour construire des ponts dans les chemins vicinaux



Eugène Freyssinet va pouvoir, dès ce premier poste, montrer pleinement sa façon de concevoir son métier et son rôle,

1 . donner tout son sens à sa mission du Service Public.

Il rend « service » aux petites communes en se mettant à leur place pour connaître leurs besoins. C'est ainsi qu'il propose des ponts en béton pour un montant 5 fois moins cher qu'un pont en maçonnerie, sous réserve que la commune mette à sa disposition la main d'œuvre nécessaire pour construire ses ponts

2 . satisfaire ses préoccupations.

« Pour chacun de ces ouvrages, je n'hésite pas à m'impliquer totalement, assumer toutes les fonctions et jouer tous les rôles : concepteur, calculateur, mais aussi gestionnaire, chef de chantier, et même charpentier, coffreur, ferrailleur, ouvrier pour apprendre aux gars du pays, et découvrir avec eux, les meilleurs moyens pour faire, vite et bien, coffrages et armatures, et pour couler des bétons bien pleins ».

3 . user d'une grande liberté vis-à-vis des règlements et des habitudes.

il a très vite compris que les règlements de l'époque ne sont pas compatibles avec les observations qu'il constate sur les chantiers et il va oser s'en affranchir avec raison

4 . faire travailler le béton dans le domaine où il excelle : la compression

privilégier les arcs et donner des formes aux structures qu'il conçoit pour améliorer le cheminement des efforts vers la compression faisant ainsi des économies substantielles

François Mercier (1858 – 1920)

notable du Bourbonnais et ami de Georges Clémenceau
collaborateur sans faille de Freyssinet pendant plus de 10 ans



Le père a une petite entreprise à Tronget (ville de 1100 habitants en 1905).

Puis l'entreprise construit plusieurs lignes à voie métrique dans le département dont celle de Cusset à Lavoine dont les travaux ont été supervisés par Freyssinet. Siège social déplacé près de la gare de Moulins

Et grossit encore en construisant des lignes normales en France et au Portugal. Siège social déplacé près de la gare Saint Lazare.

Elle atteint au maximum 5 000 employés

Avec son épouse Marie Anne Cougignon il va construire deux sanatoriums dans l'Allier

En 1914, l'entreprise Limousin et l'entreprise Mercier fusionnent et Freyssinet en devient le directeur technique

204		VICHY A LAVOINE-LAPRUGNE	
<i>(P. L. M.)</i>			
Vichy (188, 189).....	6	6	6
Cusset.....	7	7	7
Holles.....	8	8	8
Le Mayet-de-Montagne (202).....	9	9	9
Le Mayet-de-Montagne (202).....	10	10	10
Lavoine-Laprugne.....	11	11	11
<i>(202)</i>			
Lavoine-Laprugne.....	12	12	12
Le Mayet-de-Montagne.....	13	13	13
Le Mayet-de-Montagne.....	14	14	14
Le Mayet-de-Montagne.....	15	15	15
Le Mayet-de-Montagne.....	16	16	16
Le Mayet-de-Montagne.....	17	17	17
Le Mayet-de-Montagne.....	18	18	18
Le Mayet-de-Montagne.....	19	19	19
Le Mayet-de-Montagne.....	20	20	20
Le Mayet-de-Montagne.....	21	21	21
Le Mayet-de-Montagne.....	22	22	22
Le Mayet-de-Montagne.....	23	23	23
Le Mayet-de-Montagne.....	24	24	24
Le Mayet-de-Montagne.....	25	25	25
Le Mayet-de-Montagne.....	26	26	26
Le Mayet-de-Montagne.....	27	27	27
Le Mayet-de-Montagne.....	28	28	28
Le Mayet-de-Montagne.....	29	29	29
Le Mayet-de-Montagne.....	30	30	30
Le Mayet-de-Montagne.....	31	31	31
Le Mayet-de-Montagne.....	32	32	32
Le Mayet-de-Montagne.....	33	33	33
Le Mayet-de-Montagne.....	34	34	34
Le Mayet-de-Montagne.....	35	35	35
Le Mayet-de-Montagne.....	36	36	36
Le Mayet-de-Montagne.....	37	37	37
Le Mayet-de-Montagne.....	38	38	38
Le Mayet-de-Montagne.....	39	39	39
Le Mayet-de-Montagne.....	40	40	40
Le Mayet-de-Montagne.....	41	41	41
Le Mayet-de-Montagne.....	42	42	42
Le Mayet-de-Montagne.....	43	43	43
Le Mayet-de-Montagne.....	44	44	44
Le Mayet-de-Montagne.....	45	45	45
Le Mayet-de-Montagne.....	46	46	46
Le Mayet-de-Montagne.....	47	47	47
Le Mayet-de-Montagne.....	48	48	48
Le Mayet-de-Montagne.....	49	49	49
Le Mayet-de-Montagne.....	50	50	50
Le Mayet-de-Montagne.....	51	51	51
Le Mayet-de-Montagne.....	52	52	52
Le Mayet-de-Montagne.....	53	53	53
Le Mayet-de-Montagne.....	54	54	54
Le Mayet-de-Montagne.....	55	55	55
Le Mayet-de-Montagne.....	56	56	56
Le Mayet-de-Montagne.....	57	57	57
Le Mayet-de-Montagne.....	58	58	58
Le Mayet-de-Montagne.....	59	59	59
Le Mayet-de-Montagne.....	60	60	60
Le Mayet-de-Montagne.....	61	61	61
Le Mayet-de-Montagne.....	62	62	62
Le Mayet-de-Montagne.....	63	63	63
Le Mayet-de-Montagne.....	64	64	64
Le Mayet-de-Montagne.....	65	65	65
Le Mayet-de-Montagne.....	66	66	66
Le Mayet-de-Montagne.....	67	67	67
Le Mayet-de-Montagne.....	68	68	68
Le Mayet-de-Montagne.....	69	69	69
Le Mayet-de-Montagne.....	70	70	70
Le Mayet-de-Montagne.....	71	71	71
Le Mayet-de-Montagne.....	72	72	72
Le Mayet-de-Montagne.....	73	73	73
Le Mayet-de-Montagne.....	74	74	74
Le Mayet-de-Montagne.....	75	75	75
Le Mayet-de-Montagne.....	76	76	76
Le Mayet-de-Montagne.....	77	77	77
Le Mayet-de-Montagne.....	78	78	78
Le Mayet-de-Montagne.....	79	79	79
Le Mayet-de-Montagne.....	80	80	80
Le Mayet-de-Montagne.....	81	81	81
Le Mayet-de-Montagne.....	82	82	82
Le Mayet-de-Montagne.....	83	83	83
Le Mayet-de-Montagne.....	84	84	84
Le Mayet-de-Montagne.....	85	85	85
Le Mayet-de-Montagne.....	86	86	86
Le Mayet-de-Montagne.....	87	87	87
Le Mayet-de-Montagne.....	88	88	88
Le Mayet-de-Montagne.....	89	89	89
Le Mayet-de-Montagne.....	90	90	90
Le Mayet-de-Montagne.....	91	91	91
Le Mayet-de-Montagne.....	92	92	92
Le Mayet-de-Montagne.....	93	93	93
Le Mayet-de-Montagne.....	94	94	94
Le Mayet-de-Montagne.....	95	95	95
Le Mayet-de-Montagne.....	96	96	96
Le Mayet-de-Montagne.....	97	97	97
Le Mayet-de-Montagne.....	98	98	98
Le Mayet-de-Montagne.....	99	99	99
Le Mayet-de-Montagne.....	100	100	100



Premiers ponts

Comment reconnaître un pont Freyssinet ?

Par ses garde-corps

par ses cornières métalliques

par ses trottoirs en console



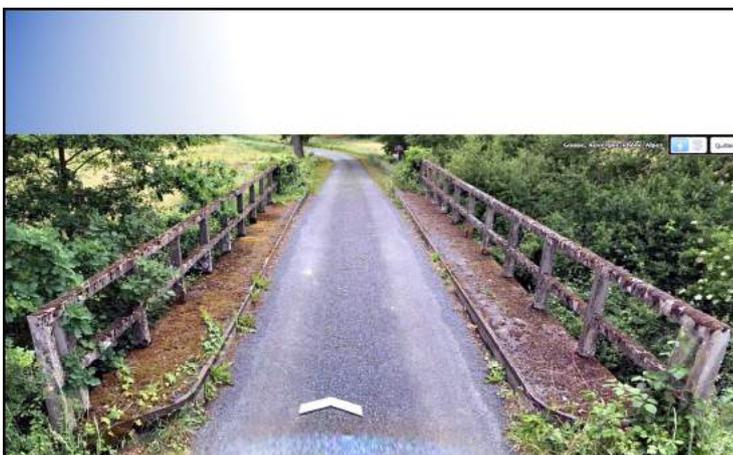
I Ponts en voûte à petite portée



Chez Néglot au Breuil
46°10'07"N 3°40'12"E



Moulin d'Entremiolles à Bayet
46°15'37"N 3°16'33"E 1906



Gouise (1906)
46°24'40"N 3°24'18"E



Le Pouthier à La Chapelle
46°05'25"N 3°37'07"E

II Ponts avec tablier horizontal



Le Bois Dieu à Isserpent
46°09'24"N 3°37'35"E



Le Pont Morel à Arfeuilles
46°10'48"N 3°44'36"E



Le Moulin Laleure à Arfeuilles
46°09'46"N 3°45'38"E



Pont chemin de fer à Cusset
46°08'17"N 3°28'10"E



Sept Fons à Diou
46°32'18"N 3°42'35"E



III Ponts sur existants



A gauche pied de voûte



A droite cornière sur la culée

Traces d'un ancien pont à Bayet

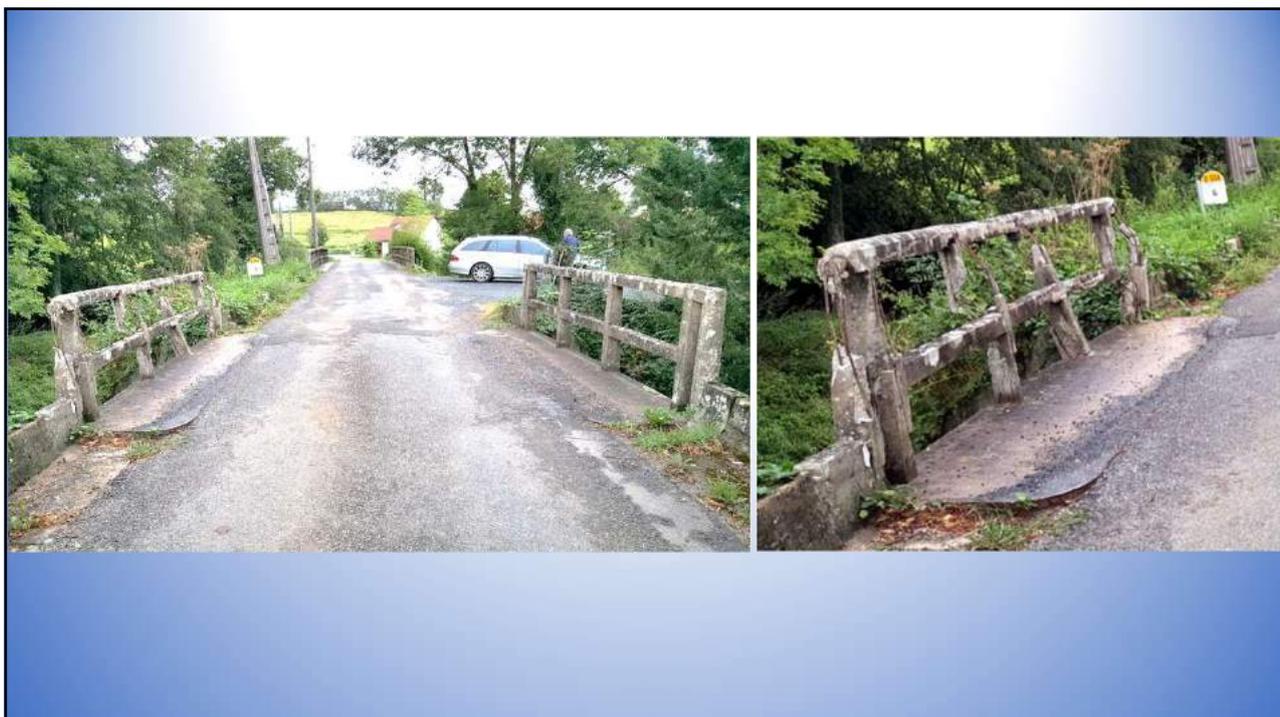
46°12'40"N 3°16'15"E



Le Moulin de Celzat à Creuzier le Neuf

46°11'04"N 3°27'54"E

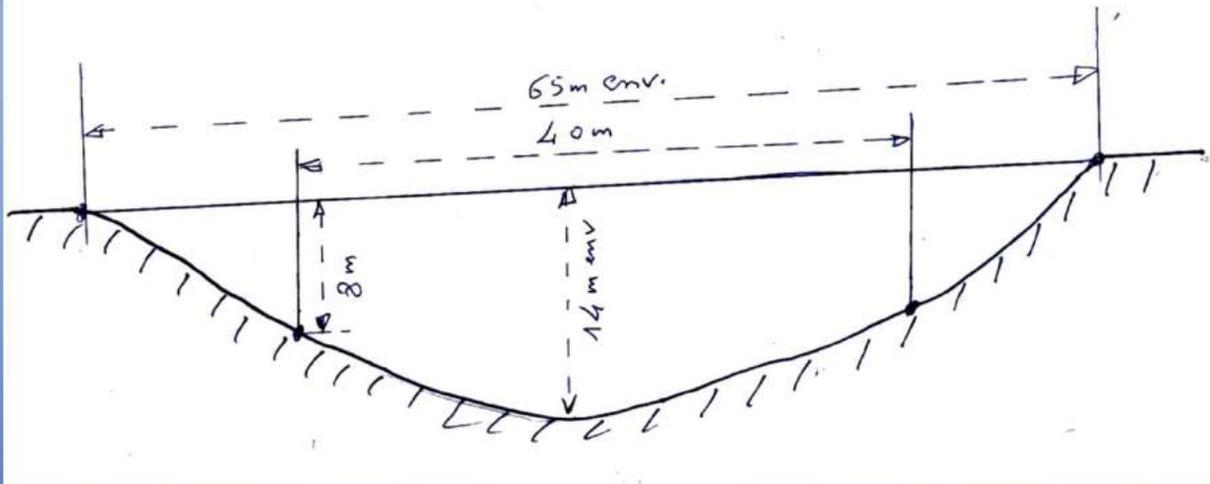
Il y a un grand pont au premier plan et un petit au second plan



Bois des Arnefauds au Breuil
46°11'57"N 3°37'36"E

Le Bourg à Brugheas
46°04'29"N 3°22'12"E

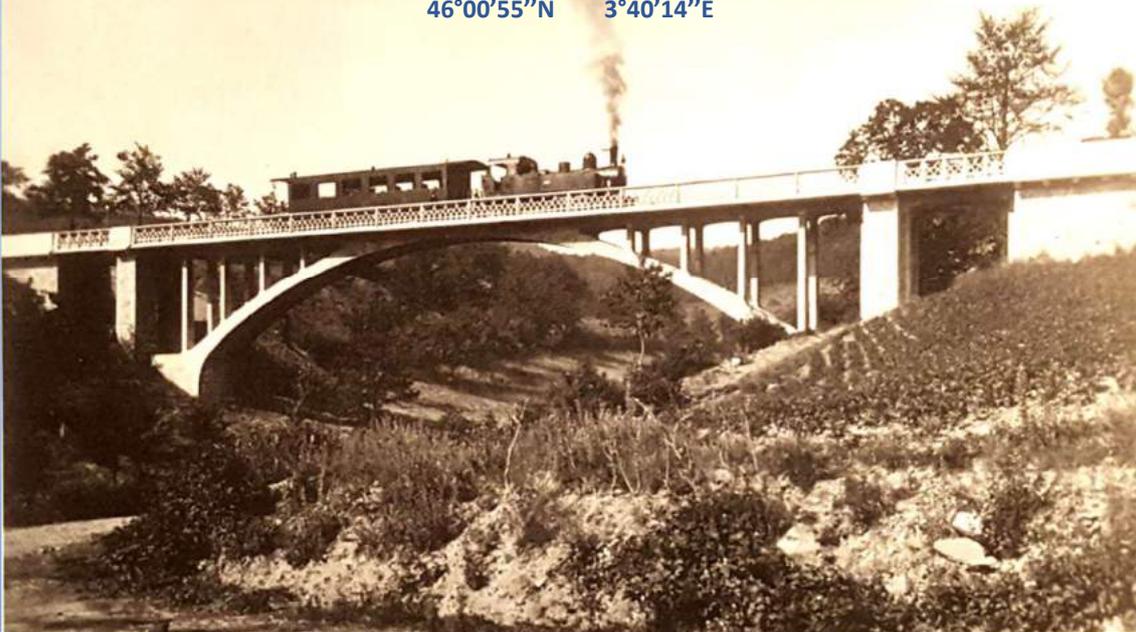
IV Pont « hors catégorie »



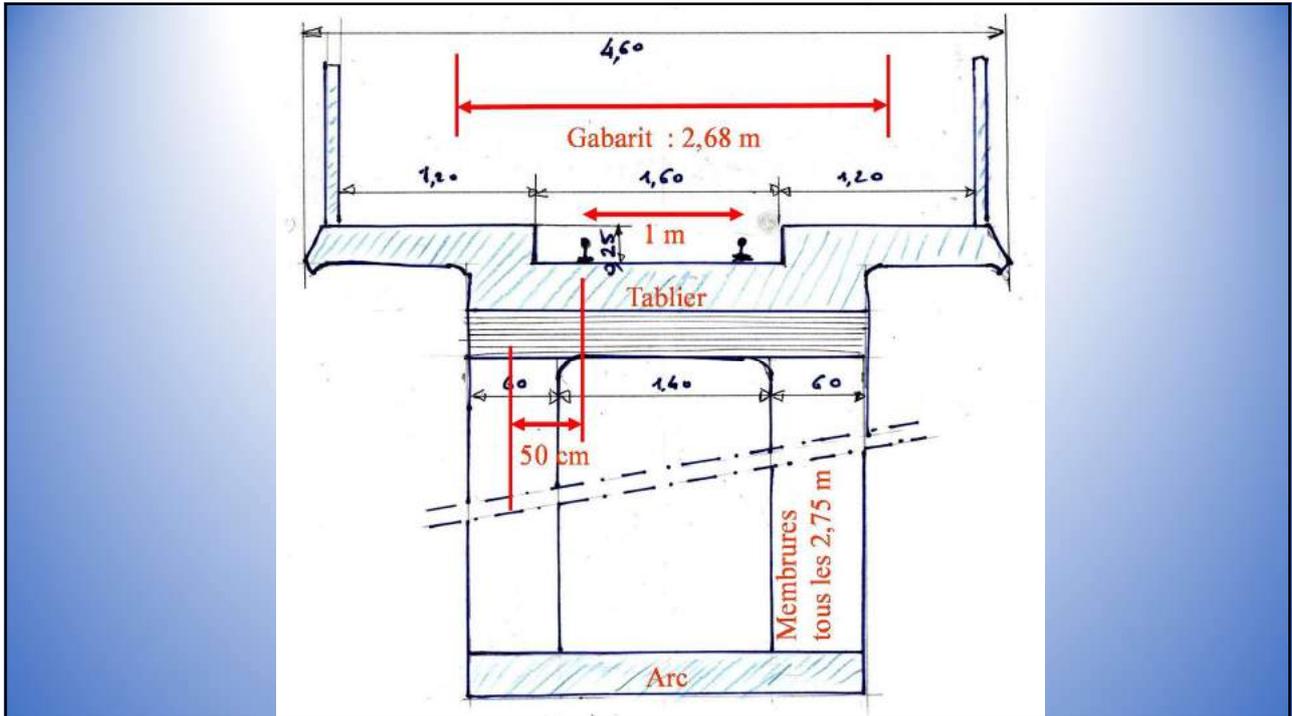
Comment franchir une brèche de 65 m de large et 14 m de profond ?

Ferrières sur Sichon le Moulin neuf (1909)

46°00'55"N 3°40'14"E







Démarrage d'une carrière fulgurante

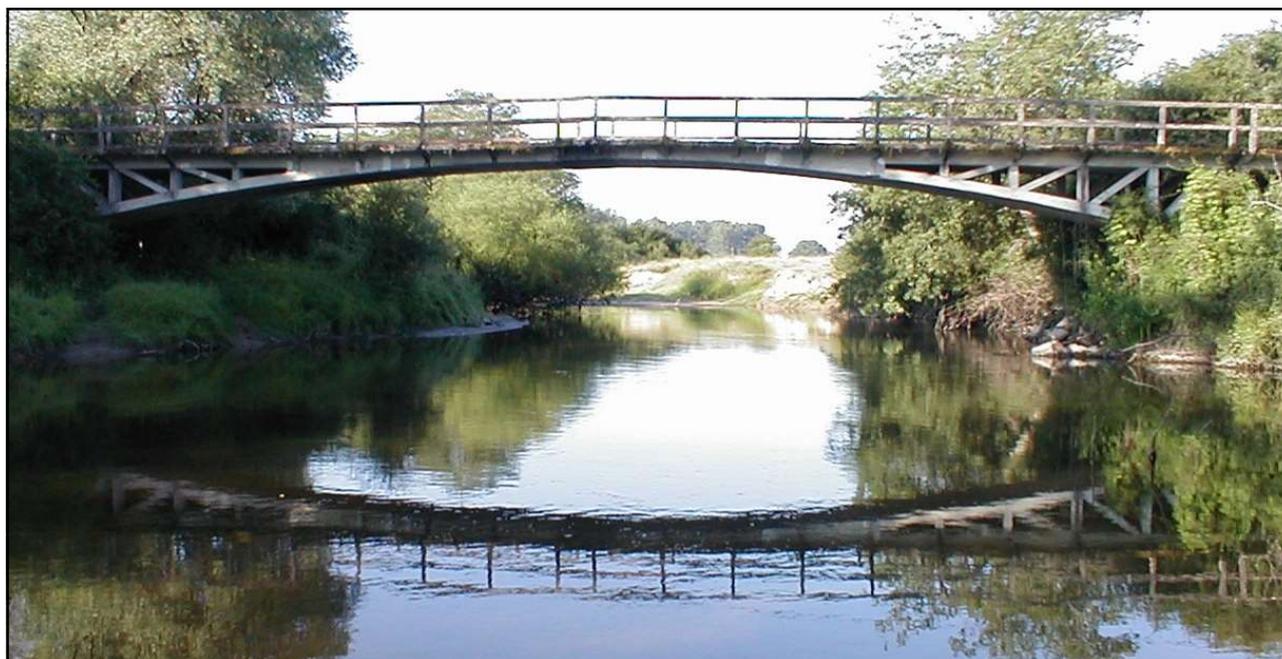
Avec des arcs très tendus et de plus en plus grands



Cusset sur le Jolan

46°07'52,5"N 3°29'33,3"E

Portée 15 m environ



Prairéal à Vaumas

portée 26 m



Prairéal
avant nettoyage



Prairéal
après nettoyage



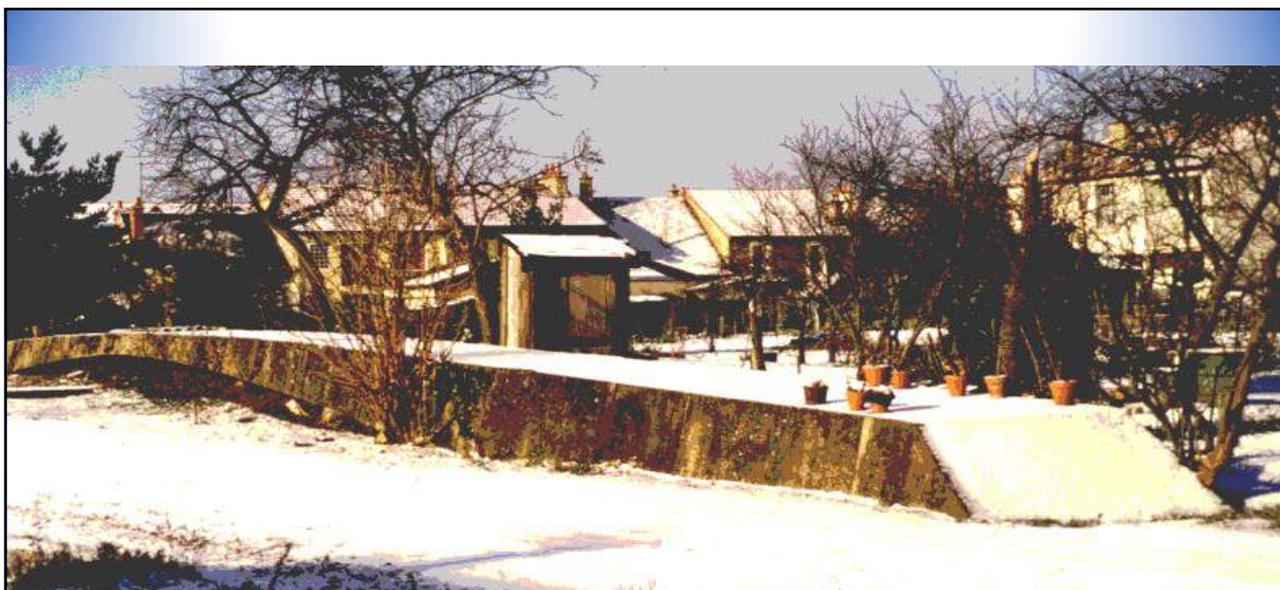
Saint Prix le Moulin neuf 46°12'24"N 3°39'00"E portée 32 m



BAYET (Allier) — Le Pont

Edit. Mercier - Cl. Perraguin

Bayet le Chambon (démoli en 1944) 46°14'34"N 3°16'13"E portée 40 m



Arche d'essai à Moulins

46°33'20"N 3°20'04"E

Portée 50 m

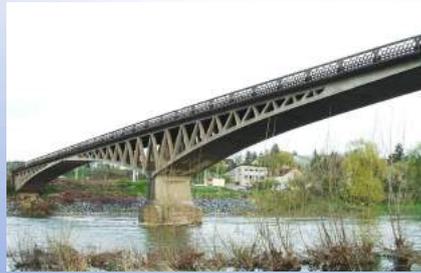


Le Veudre



Chatel de Neuvre

Portées 73 m



Boutiron

Ces 3 ponts ont remplacé...



Le Veudre

... ces 3 ponts suspendus :



Chatel de Neuvre



Boutiron



Conclusion

De 1905 à 1913
Eugène Freyssinet
a construit
au moins 23 ponts
« dont je ne crois pas qu'il y en ait deux identiques »
et plusieurs bâtiments
en Bourbonnais !

De quoi créer
un mémorial et
une route historique
des ponts
de Freyssinet

Parmi ces ouvrages que vous a présentés Pierre DAUMIN, une mention particulière doit être portée sur le Pont de Prairéal, construit en 1907. Comme il vous l'a montré, il s'agit d'un pont en arc très tendu, de portée moyenne 26 m, comportant trois articulations métalliques, deux aux naissances de l'arc et une à la clé, comme l'imposaient les Règlements de l'époque, et dont le tablier supérieur est soutenu par des pilettes et des diagonales formant une sorte de treillis.

Outre sa grande finesse et sa légèreté, une disposition fondamentale est attachée à cet ouvrage : sa **méthode de construction**

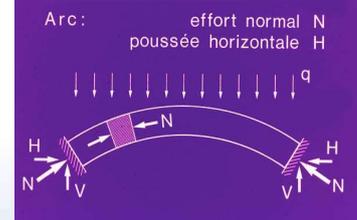




Eugène Freyssinet privilégie particulièrement les arcs plutôt que les poutres droites en béton armé. Avant de parler du Pont de Prairéal, quelques mots sur les Ponts en ARC, leur mode de fonctionnement et leur méthode de construction

L'effet d'arc ou « effet de voûte » découvert depuis l'antiquité qui va supplanter le « linteau » (la Porte des Lionnes à Mycènes en Grèce)

Mode de fonctionnement de la structure : **compression**
Pourquoi un arc est-il comprimé ?



deux types de Pont en Arc :

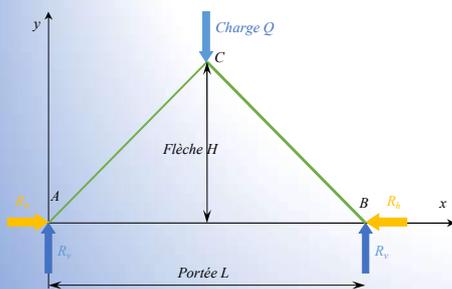
Les ponts en arc à tablier supérieur (poussée horizontale reprise par le sol de fondation des culées)



Les ponts en arc à tablier inférieur (bow-strings) (poussée horizontale reprise par le tablier inférieur formant tirant)

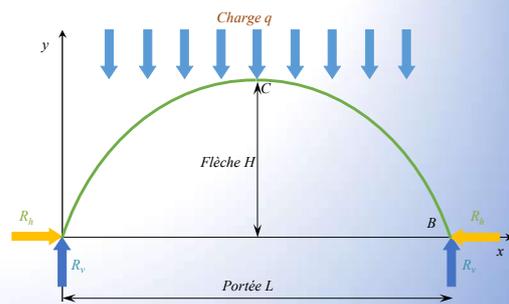


Sans entrer dans le détail des calculs et du comportement des ponts en arc, quelques notions sur l'importance de cette **poussée horizontale** (et donc de la compression dans l'arc) :



Sous une charge ponctuelle (arc assimilé à deux béquilles) :

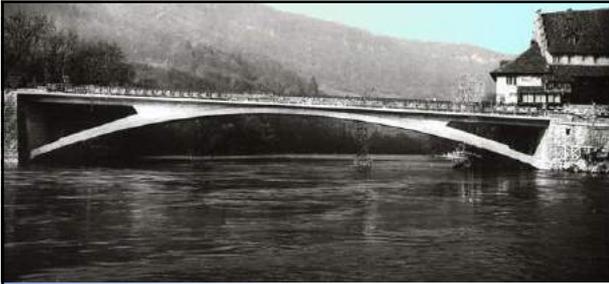
Composante verticale de la poussée de l'arc : $R_v = Q/2$
Composante horizontale de la poussée de l'arc : $R_h = LQ/4H$



Sous une charge uniformément répartie :

Composante verticale de la poussée de l'arc : $R_v = qL/2$
Composante horizontale de la poussée de l'arc : $R_h = qL^2/8H$

Cette poussée horizontale se développe au fur et à mesure que la charge verticale s'applique, Lors du décentrement, au fur et à mesure que le cintre se décharge, le poids du béton se transmet à l'arc en le comprimant et en développant des poussées horizontales au droit des culées

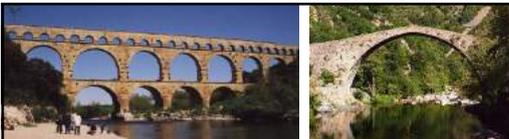
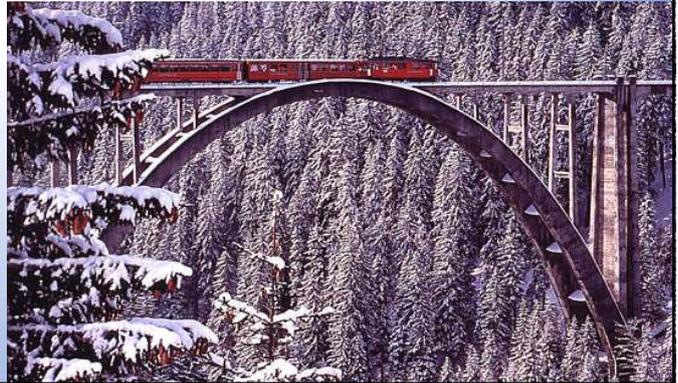


L'arc peut être **très tendu**, comme dans le cas de l'ouvrage ci-dessus



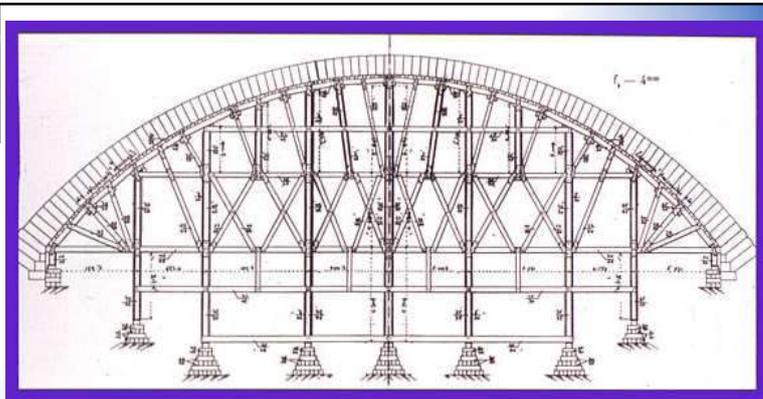
ou le Pont de Prairéal : la poussée horizontale R_h est alors très élevée

L'arc peut au contraire être **très peu tendu**,
comme dans le cas de ce pont ci-contre
on dit qu'il est « plein cintre »
(demi cercle complet) :
la poussée horizontale R_h
est alors réduite, proche de R_v



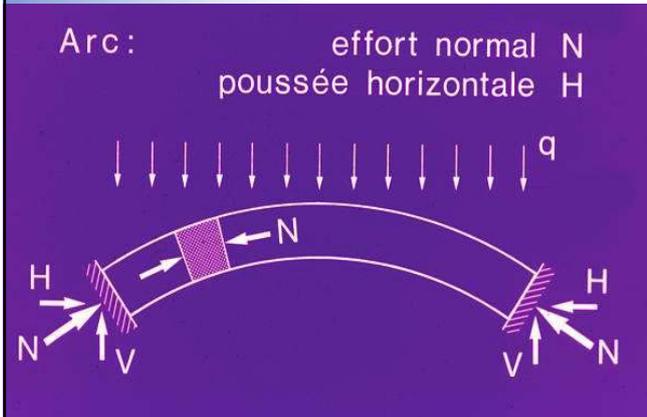
Sur le plan constructif, depuis des millénaires,
les arcs, aussi bien en pierres à l'époque des
Romains que plus tard en béton, étaient
construits sur des cintres en bois, parfois aussi
acrobatiques que spectaculaires...

Le décintrement consistait à démonter ou à
descendre le cintre plus ou moins brutalement
(parfois en les brûlant, plus souvent en vidant des
boîtes à sable sur lesquelles ils s'appuyaient),



Comme nous l'avons vu, les poussées horizontales se développent au fur et à mesure que la charge verticale s'applique, Donc, lors du décentrement, au fur et à mesure que le cintre se décharge, le poids du béton se transmet à l'arc en le comprimant et en développant ses poussées horizontales au droit des culées. C'est ainsi que s'effectue ce transfert de charge du cintre à l'arc.

Ces anciennes méthodes, certes classiques, étaient néanmoins dangereuses et pouvaient même parfois s'avérer fatales, si la descente du cintre, ou son démontage, ne se faisait pas de façon parfaitement symétrique. En effet, durant une telle opération de démontage, certaines parties de la voûte sont encore soutenues par le cintre alors que d'autres ne le sont plus, et « l'effet d'arc » ne pouvant pas encore se produire, les parties non soutenues peuvent s'effondrer.



- démontage du cintre élément par élément :

difficile, voire impossible

(le cintre est chargé par le poids du béton coulé, et tous les assemblages sont bloqués, sous charge)

- destruction du cintre en lui mettant le feu :

dangereux

(il n'y a aucune raison que le feu se propage de façon régulière sur tout l'échafaudage et que la mise en charge de l'arc se fasse de façon symétrique)

- descente du cintre par dévérinage de ses appuis:

aléatoire

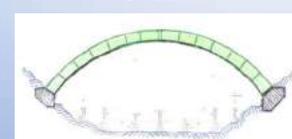
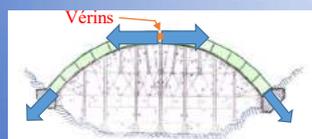
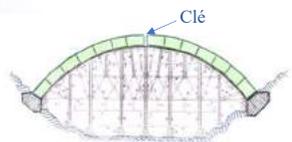
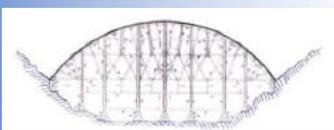
(il est difficile et aléatoire de vider les boîtes à sable de façon symétrique)

De nombreuses voûtes par le passé s'étaient effondrées lors de leur décentrement.

Au lieu d'attendre que cette poussée se soit développée toute seule au fur et à mesure de la disparition du cintre, Eugène FREYSSINET va provoquer, avec ses vérins, cette poussée horizontale pour que l'arc prenne en charge lui-même progressivement son propre poids.

Pour la première fois au Monde, à l'occasion de la construction du pont de Prairéal, Eugène FREYSSINET va procéder au décentrement de son arc en mettant la voûte en compression. Pour cela, il écarta, avec des moyens rudimentaires, les deux lèvres de l'articulation centrale.

Principe du décentrement d'un arc par vérinage à la clé



C'est une innovation **fondamentale**

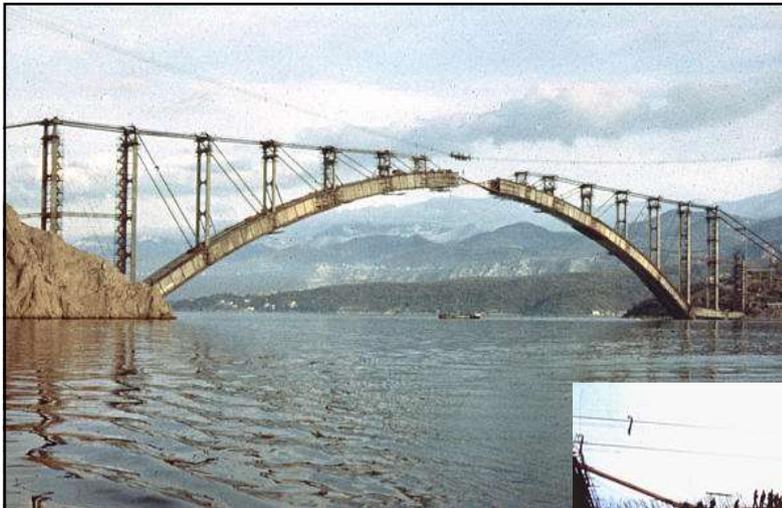




Pont de Caracas (Venezuela) en 1953

Même si aujourd'hui, la construction des ponts en arc sur cintre a disparu et remplacée par la méthode de haubanage provisoire (solution d'ailleurs utilisée pour la première fois par Eugène Freyssinet à Caracas), ce principe du « décintrement par vérinage à la clé » inventé à Prairéal, est aujourd'hui universellement utilisée pour la construction de tous les ponts en arcs. Cette mise en pression des vérins de décintrement se traduit alors par la détention progressive des haubans de retenue

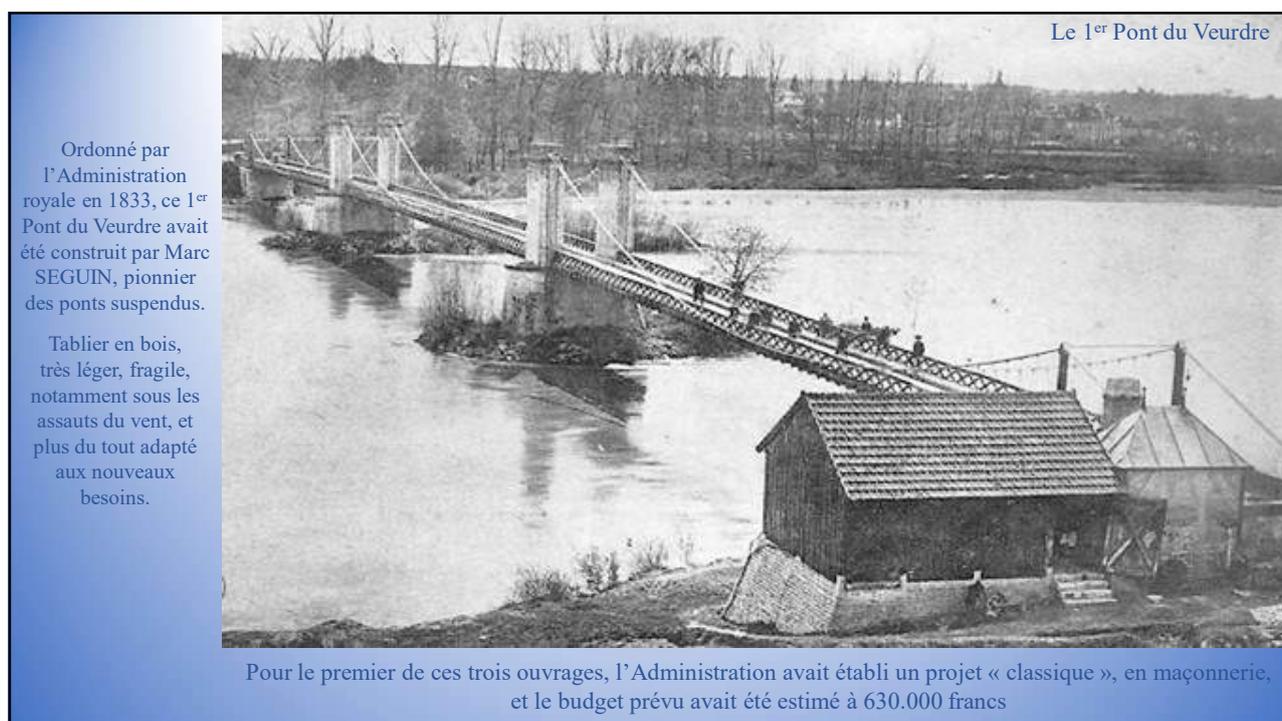
Ce haubanage provisoire, qui remplace le cintre en soutenant les demi arcs sur chaque rive, peut être « direct », comme utilisé à Caracas ou ci-contre,....

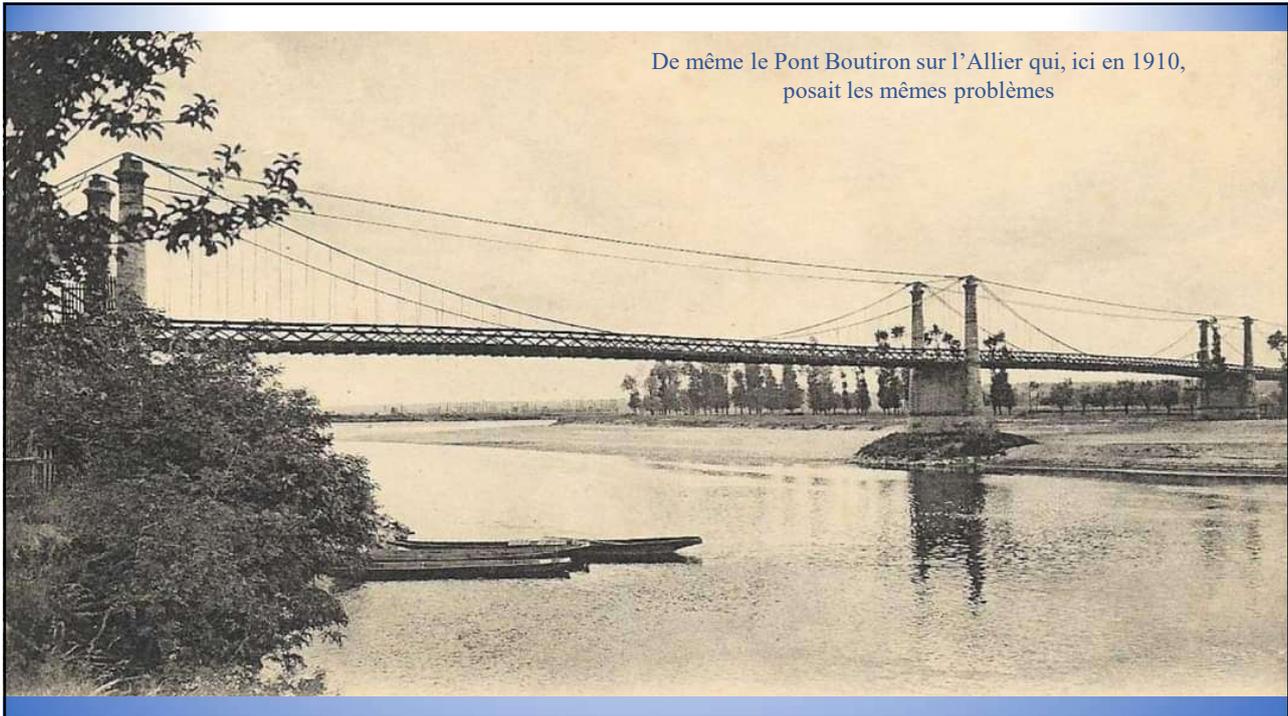


Sur ce grand Pont de Krk en Croatie (390 m de portée) réalisé en 1978, le vérinage est effectuée par l'intermédiaire de deux avant-becs métalliques de 15 m de longueur permettant de réduire l'importance du haubanage, en « gagnant » 30 m de portée

... ou triangulé, comme ci-contre, ce qui permet de rigidifier ces consoles en encorbellement, notamment pour les très grandes portées.





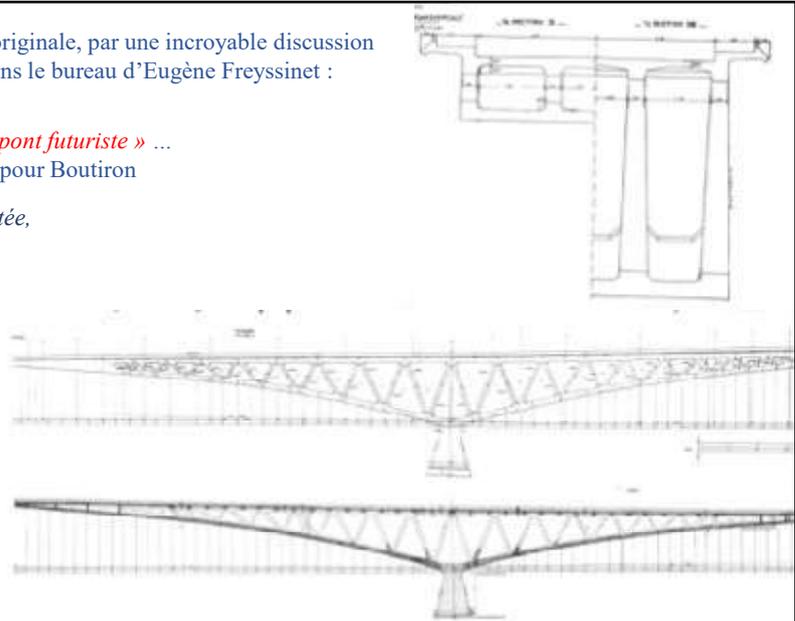


Cette « aventure » commence de façon très originale, par une incroyable discussion avec François Mercier, en mars 1908, dans le bureau d'Eugène Freyssinet :

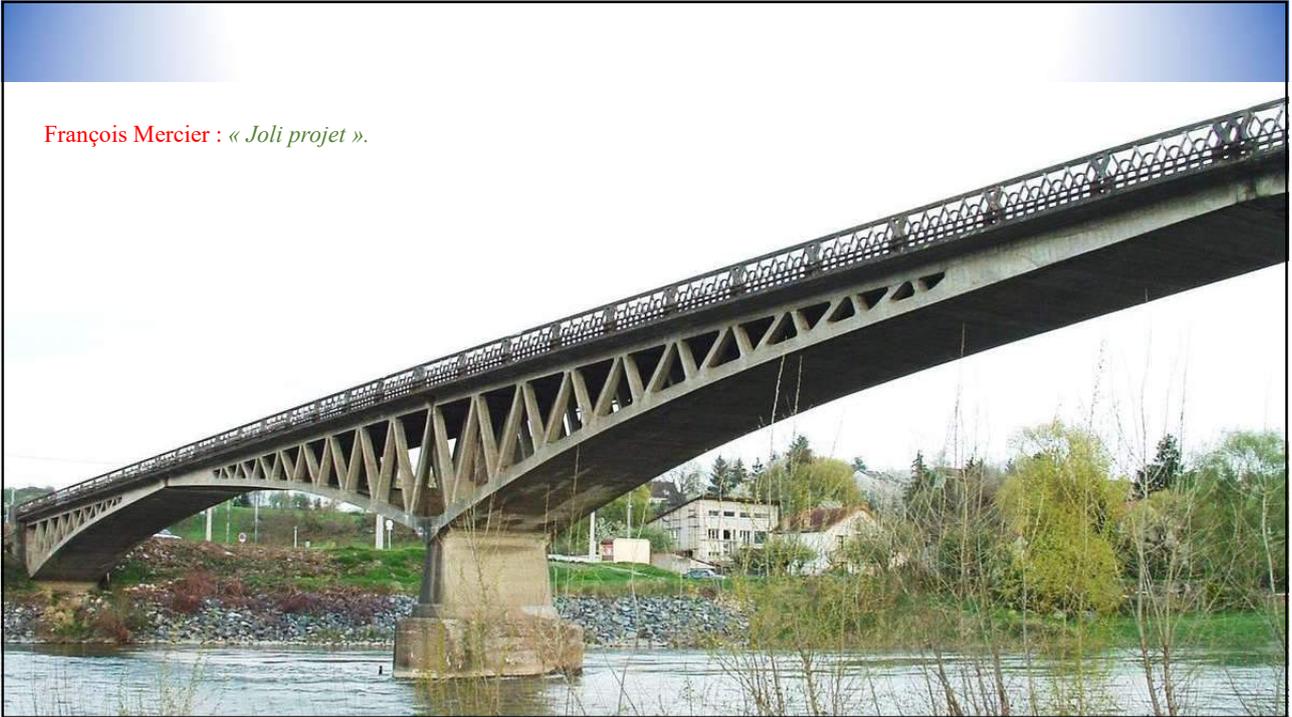
au mur : un plan est affiché, l'esquisse d'un « *pont futuriste* » ... imaginé et dessiné par lui comme un exercice pour Boutiron

*trois travées en arc articulées de 72,50 de portée,
hourdis supérieur supportant la chaussée
hourdis inférieur en forme d'arc
reliés par 4 tympans triangulés
d'une extraordinaire légèreté,
le tout en béton
faiblement
armé*

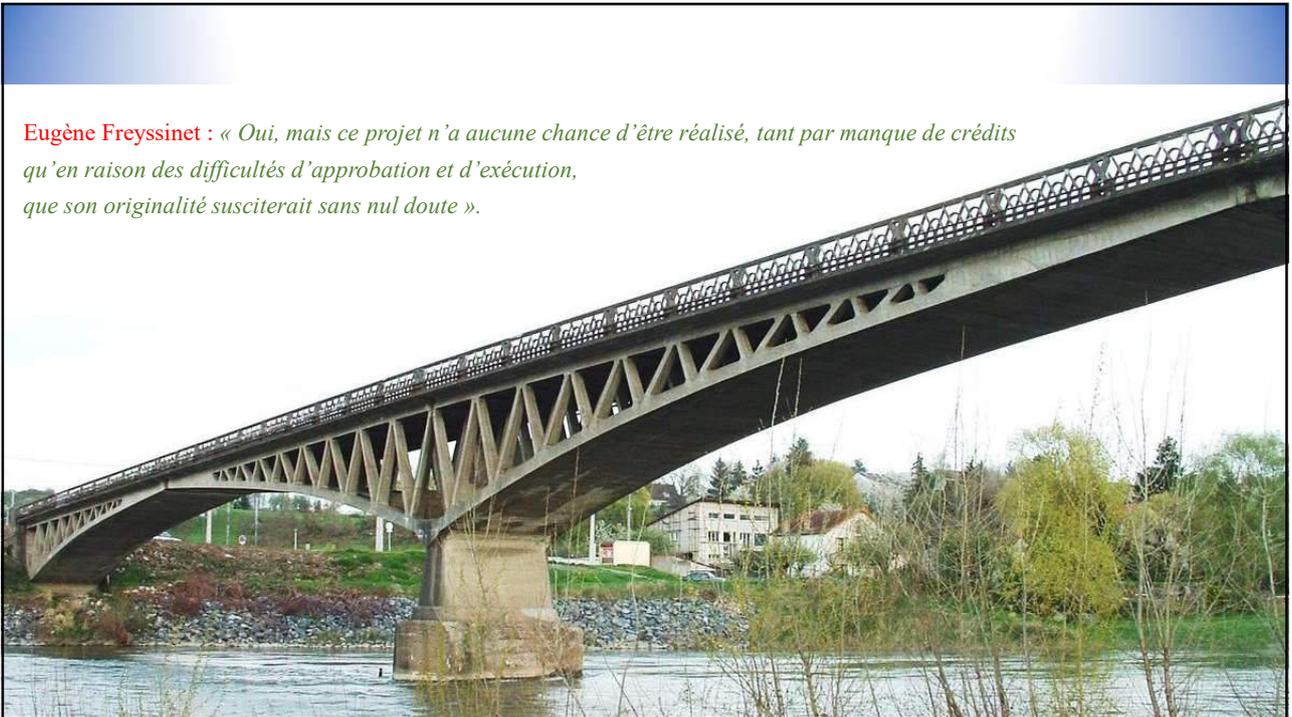
une discussion s'engage :



François Mercier : « Joli projet ».



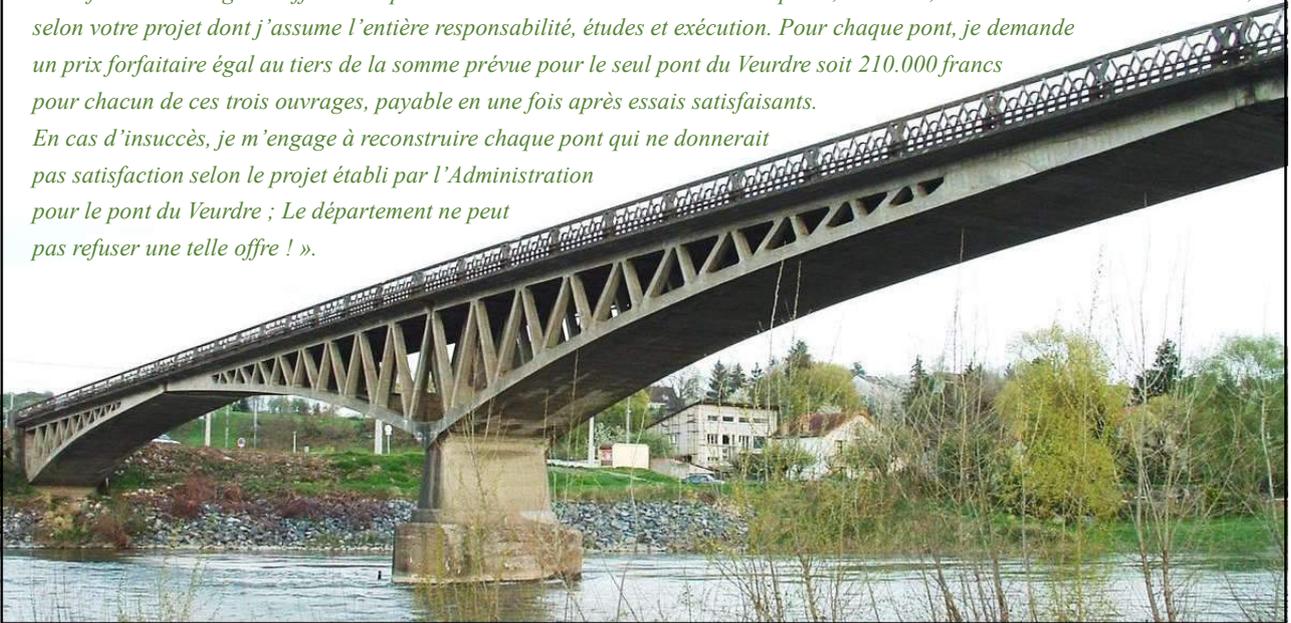
Eugène Freyssinet : « Oui, mais ce projet n'a aucune chance d'être réalisé, tant par manque de crédits qu'en raison des difficultés d'approbation et d'exécution, que son originalité susciterait sans nul doute ».



François Mercier : « Ce projet me plaît et **je veux** que **vous** l'exécutiez en pleine liberté et sous votre seule responsabilité.

C'est facile à arranger. J'offre au Département la reconstruction de ses trois ponts, Boutiron, Châtel-de-Neuvre et Le Veurdre, selon votre projet dont j'assume l'entière responsabilité, études et exécution. Pour chaque pont, je demande un prix forfaitaire égal au tiers de la somme prévue pour le seul pont du Veurdre soit 210.000 francs pour chacun de ces trois ouvrages, payable en une fois après essais satisfaisants.

En cas d'insuccès, je m'engage à reconstruire chaque pont qui ne donnerait pas satisfaction selon le projet établi par l'Administration pour le pont du Veurdre ; Le département ne peut pas refuser une telle offre ! ».



L'aventure du Pont du Veurdre commence

François Mercier signe un papier s'engageant et trois jours après :

le conseil Général accepte cette proposition

le 8 mai 1908, le Préfet autorise avec l'avis favorable du Ministre des Travaux Publics cette opération et ce montage :

Eugène Freyssinet est chargé, pour le Département, de l'étude, de l'exécution et du contrôle des trois ponts

Eugène Freyssinet, qui reconnaît l'extraordinaire confiance que lui a accordé François Mercier, a parfaitement conscience de ses énormes responsabilités.

« Malgré cela, d'accord avec Mercier, je jugeais nécessaire de consentir 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. Notamment, comment se comporteraient au décintrement, des voûtes très plates, peu armées, dont la résistance au cisaillement était pratiquement nulle avant la naissance des poussées ? Le décollement des voûtes et du cintre posait maints problèmes, et je voulais essayer le système à une échelle suffisante ».

d'où l'**Arche d'essai** : 50 m de portée - 2,00 m de flèche.....

dont va maintenant vous parler Pierre JARTOUX, celui qui la connaît le mieux



Photo Robert Daumin

Arche d'essais du pont du Veudre

Le devenir de ce Monument Historique

Pierre Jartoux

Au printemps 1993, j'avais obtenu l'accord et les moyens de la Direction de FREYSSINET de fouiller le jardin potager dans lequel l'Arche, la belle endormie de Moulins, attendait peut-être qu'on la réveillât ? !
 Qu'allais-je découvrir dans ce paysage bucolique qu'il fallait forcément un peu bousculer ...?
 L'agence de Lyon avait mis à ma disposition un conducteur de travaux ; armé d'un tracto-pelle, il commençât prudemment la fouille, je n'avais pas le pinceau de l'archéologue mais seulement une pelle et une truelle ; le terrain sablonneux facilitait la recherche, j'avais mon marteau personnel et une pointerolle pour intervenir au moment où on rencontrerait du dur ...



Pourquoi l'Arche ?

Et que fait Freyssinet à cette époque?

Pierre Daumin vous l'a dit, il construit des ponts pour les mairies qui n'ont pas les moyens de réaliser les projets officiels! Il pratique lui-même, gâche à la pelle, définit la plasticité qui permet une bonne mise en place, met au point les formulations et dessine en même temps les formes adaptées à ce matériau (des arcs, des arrondis à grands rayons pour associer dalle et pile ou poteau et dalle). Et surtout, il observe, il cherche à maîtriser la fissuration et projette des arcs de portées de plus en plus grande et c'est cela qui met le doute dans son esprit:

« Notamment comment se comporteraient au décintrement, des voûtes très plates, peu armées, dont la résistance au cisaillement était pratiquement nulle avant la naissance des poussées? Le décollement des voûtes du cintre posait maints problèmes, et je voulais essayer le système à une échelle suffisante. »

Et c'est pour cela qu'il entreprend la construction de **L'Arche d'Essai du Pont du Veurdre!**

Un peu d'histoire

Nous sommes au début du XXe siècle. Tout ce que la France et le monde comptent d'Ingénieurs bâtisseurs essayant d'utiliser ce sidéro-ciment (le futur Béton) pour faire avec, autre chose que du mobilier de jardin ou des barrières en faux bois (il ne pourrait pas!) pour les parcs d'agrément. Alors comme la République exige que l'on réglemente ces applications, la fine fleur des ingénieurs français, les Hennebique, Harel de la Noë, Coignet, Rabut, sous la direction de Considère, élabore une réglementation. **Ce matériau bouscule leur formation intellectuelle et ils sont envahis par le doute car**

« On constatait des faits remarquables mais qui paraissaient contraires à toutes les idées reçues dans la résistance des matériaux et de la science de l'élasticité. »

Qu'importe, c'est le résultat de méthodes d'expérimentations défectueuses, mais en 1906 la commission publie la

« Circulaire du 20 octobre 1906 concernant les instructions relatives à l'emploi du béton armé ».

Elle entérine le fait que, comme l'acier, le béton est un matériau élastique qui doit se comporter comme tel !

Où et comment construire l'Arche:

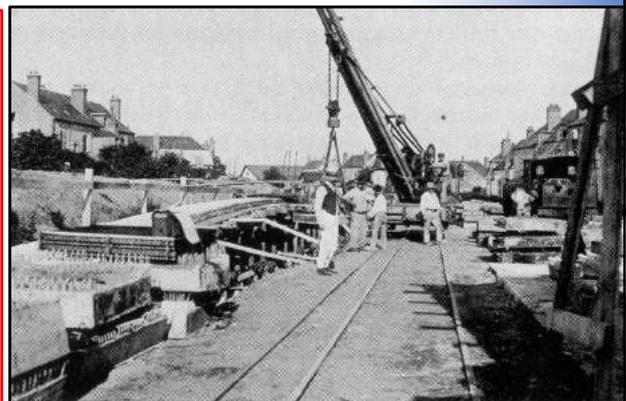
On lui octroie un terrain sur le domaine ferroviaire remarquablement bien placé à proximité de la RN7 et jouxtant la ligne ferroviaire du Tacot (chemin de fer à voie étroite) ce qui lui donnera l'opportunité de faire préfabriquer une partie de l'arche (le temps presse car l'ouvrage du Veurdre est déjà en travaux).

Au plan constructif ce terrain *« ne valait rien »* affirme Freyssinet. Impossible de construire des culées pour appuyer l'arche à construire.

Or **cette arche-épreuve** elle est faite pour donner des réponses aux questions que se pose Freyssinet:

- décintrement suivant la courbe de pression sans phénomène parasite du genre flambement,
- décollement du cintre progressif sans à-coups,
 - évolution de la flèche sous charge,
 - évolution de la flèche dans le temps ...

Ceci impose qu'on lui construise un véritable **berceau rigide** qui permette de la regarder naître et vivre !

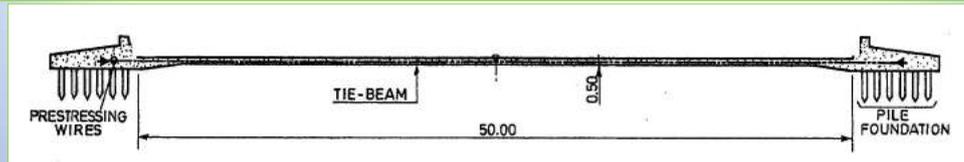


Sur cette photo d'époque on remarque à droite la locomotive du Tacot tandis que l'on décharge à la grue des éléments préfabriqués de l'arche. À gauche le cintre avec la forme de la sous-face de l'arche.

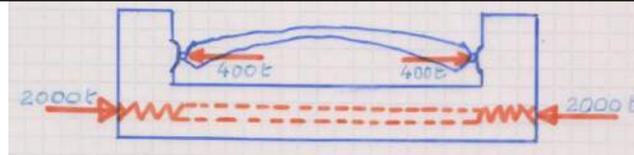
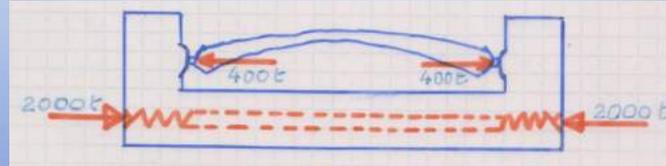
Tout se qui se passe en dessous, le fameux **berceau rigide** est déjà réalisé et enterré

Le berceau rigide de la belle endormie de Moulins

On me pardonnera cette façon poétique d'aborder un sujet aussi sérieux où je vais manipuler des centaines de tonnes. Cela n'a d'intérêt que pour insister sur le fait que pour détecter des fonctionnements espérés ou faire de la mesure, il faut beaucoup de soins et de préparation de cette éprouvette de 50 m pesant 130 tonnes.



La coupe longitudinale du berceau rigide que je désignerai désormais par le nom qui découle de la fonction que l'on va maintenant expliciter et justifier : **TIRANT-BUTON en BÉTON PRÉCONTRAIT**. Le dessin ci-dessus, à l'échelle, n'a qu'une seule vertu, avoir présent à l'esprit cette poutre de 50 m de longueur, de section 0,50 x 3,00 m. Par contre pour expliquer son rôle j'ai fait le schéma ci-dessous. C'est l'image d'un étau d'établi, avec ses deux mors et sa barre de liaison dans laquelle je remplace la tige filetée qui commande le mors mobile par un **ressort de traction fortement tendu**. Les forces sont exprimées en tonnes mais vous pouvez les lire en kilos ou en grammes qui sont plus habituelles pour le bricolage.



Vous avez bien à l'esprit notre étau aménagé et vous comprenez très bien que vous pouvez bricoler entre les mors, sans les faire bouger tant que votre bricolage (une arche en modèle réduit par exemple) n'exercera pas sur les mors un effort supérieur à 2000 grammes ou kilos (ou tonnes pour l'Arche du Veudre !).

Vous avez alors bien compris le rôle efficace de cette **pré-tension** pour interdire le mouvement des mors pendant que vous bricolez; et c'est ce que Freyssinet a trouvé comme solution pour empêcher ses culées de bouger. Mais, vous pouvez vous dire, si au lieu de ce ressort, j'avais laissé la vis originale de l'étau, j'aurais quand même pu faire mon bricolage sans faire bouger les mors!

Eh bien **NON**, si grosse que soit la vis, si faible que soit l'effort que vous allez exercer sur les mors, ils vont bouger.

C'est un principe fondamental de la mécanique : **l'application d'un effort sur une structure (sans disposition particulière) entraîne une déformation qui lui est proportionnelle.**

Et pour conclure cette digression pédagogique, que se serait-il passé si Freyssinet avait eu les moyens de s'offrir une structure en acier, largement dimensionnée pour résister à la poussée de 400 t de l'arche ? Supposons cette structure dimensionnée pour une poussée de 1000 t, avec une contrainte très faible de 1 k/mm²! (le règlement de l'époque autorisait 6 k/mm²). Le tirant-buton en acier de 50 m de longueur s'allongerait de 2,5 mm. Sous l'effort de 400 t de la poussée de l'arche, il s'allongerait de 1 mm, soit l'ordre de grandeur du fluage de l'arche.

Exprimons cela en langage technique:

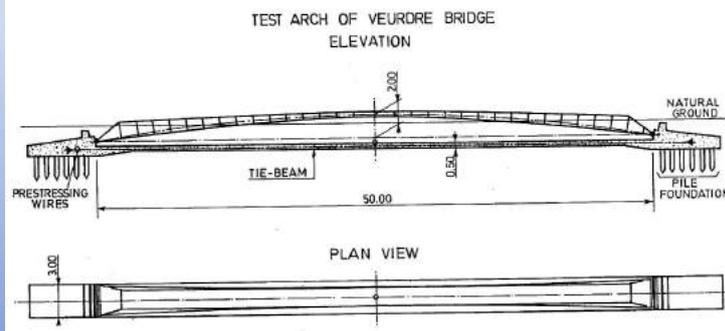
La pré-tension est une force intérieure à la structure et elle mobilise son effet pour l'aider à résister à une action externe !

Le principe de cette pré-tension ne sera breveté qu'en 1928 et ce n'est qu'en 1933 qu'il s'appellera PRÉCONTRAINTÉ

Ce préambule est un peu long, mais il fallait qu'il soit clair pour vous que lorsqu'il est question de **l'Arche d'Essai du pont du Veudre**, ce qui était attendu, il y a aussi ce que j'ai d'abord qualifié de « berceau rigide » le **Tirant-Buton Précontraint**.

Le passage du temps, aussi dur pour les choses que pour les gens, a fait que les questions que se posait Freyssinet pour la construction des arcs sont devenues des règles, des méthodes voire des caractéristiques qui font partie du bagage intellectuel de tout ingénieur constructeur et l'histoire du Veudre, si passionnante que soit ce que Michel Placidi va vous en dire, est maintenant rangée au rang de l'histoire (surtout que la guerre de 40 a démolie le pont!), alors que la précontrainte du Béton (voire de certains autres matériaux) est d'une utilisation quotidienne dans les bureaux d'études comme méthode de construction voire, lorsque l'expérience s'ajoute à la culture apprise, une méthode de penser la création d'une structure!

Voici donc résumé sur le schéma ci-dessous cette structure qui a été jugée digne d'être inscrite à l'inventaire des Monuments Historiques de la France.

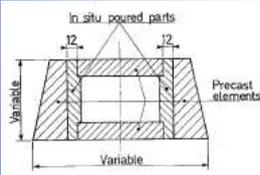


Voici ce que vous verrez cet après-midi, sans végétation, puisqu'on nous a promis de la dégager. Et quelques détails que vous ne verrez pas ...

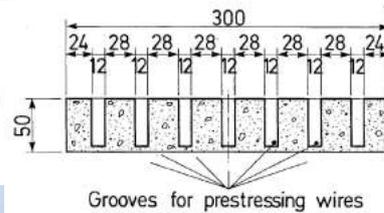
La Construction de l'arche:

Pour mieux contrôler la qualité des bétons en œuvre, j'avais pensé construire mes voûtes par éléments moulés d'avance ; je le tentais pour l'arche d'essai, mais l'exécution prouva que cette idée devançait les possibilités de l'époque.

L'observation de l'arche a permis d'imaginer la coupe transversale ci-dessous. La découverte du tirant-buton a permis de vérifier ses dimensions (3,0 x 0,5 m) sauf la profondeur des 7 gorges contenant les fils (il n'était pas facile de pénétrer sous cette couche de fils tendus sans risquer de dégradations importantes !).

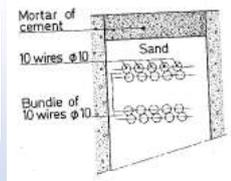


Section droite moyenne de l'arche : 1,08 m²



Les dimensions du tirant-buton sont en cm (à gauche), celles des fils en mm (à droite)

Section droite nette du tirant : 1,3m²



Avant d'aller plus avant dans la présentation de « mes » découvertes, je veux dès à présent citer Freyssinet et écrire ce qu'il raconte en 1949 des enseignements qu'il a tirés en 1909 de cette construction !

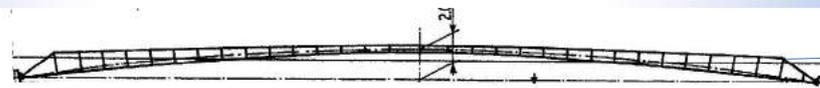
« ... l'exécution de ce tirant m'apprit tout d'abord que, contrairement à ce que j'avais craint, l'application à des masses de béton d'efforts de compression fussent-ils énormes, pouvait être réalisée facilement et à peu de frais. Mais l'observation précise des déformations tant du tirant que de la voûte **me démontra la totale inexactitude des idées officielles concernant la déformation des bétons** ».

L'Arche

Construite en 1908, abandonnée en 1914, révélée en 1949 mais n'intéressant personne, Redécouverte en 1993 pour les 50 ans de la STUP et expertisée, inscrite à l'inventaire des Monuments Historiques le 01/10/2021 et enfin sauvegardée pour la postérité!

Caractéristiques principales

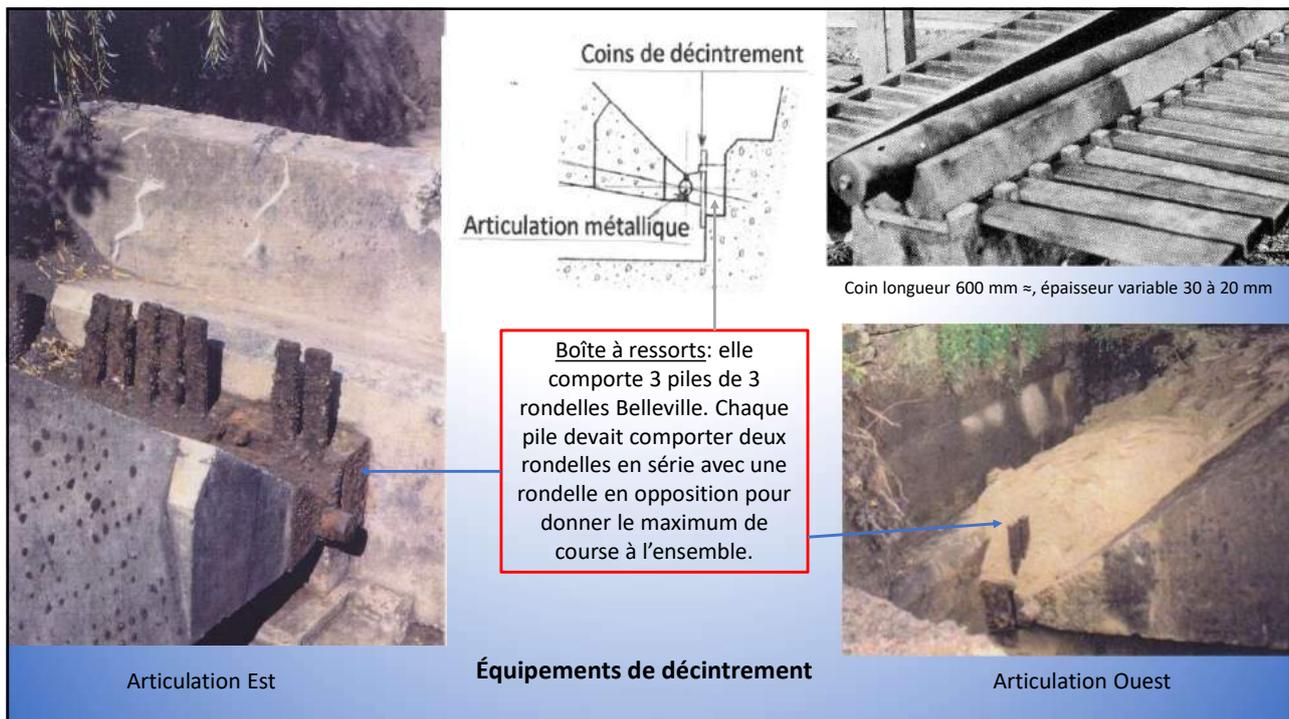
Longueur : 50 m, flèche : 2 m, masse moyenne : 2,6 t/m, masse de l'arche : 130 t , poussée de l'arche sur ces deux articulations : 400 t, contrainte moyenne dans le béton de l'arche : 3,75 MPa – 375t/m²



Niveau du sol

Difficile d'imaginer ce que pouvait être ce morceau de béton moussu, caché dans le sol, impossible à photographier de face par manque de recul. Seule l'excavation a permis de révéler l'essentiel de ce monument du patrimoine!





Considérations sur la construction, le rôle et l'épilogue de cet ouvrage d'exception:

À ce stade de la description de l'arche, il faut encore citer Freyssinet au sujet des difficultés rencontrées pour la construire et pour exploiter les résultats à moyen terme, la guerre de 14 ayant tout interrompu.

À propos du décintrement: «... *Je les remplaçais (les vérins spéciaux) pour l'arche d'essai, par des coins d'acier enfoncés à la masse, qui comprimaient chacun trois piles de trois rondelles Belleville placées en arrière des articulations, aux deux retombées. La somme des réactions élastiques de tous ces ressorts devait fournir la poussée directe.* »

« Mes prévisions se réalisèrent exactement. Je pus soulever l'arche au-dessus de son cintre par le jeu des coins, amorcer à volonté un flambement à gauche, puis à droite, enfin rétablir la rectitude de l'arche. »

« Aussitôt la voûte d'essai terminée, j'organisais l'enregistrement continu des déplacements des articulations et de plusieurs points de l'intrados, par rapport à des massifs parfaitement et certainement indépendants des ouvrages à étudier. »

Et enfin l'épilogue (triste) de l'utilisation de l'arche: «... j'établis un programme d'étude des déformations lentes du béton en utilisant les mouvements de l'arche d'essai; je m'étais entouré de nombreux collaborateurs, jeunes et enthousiastes. Malheureusement, la jeunesse a ses inconvénients, car nous dûmes tous partir le 31 juillet 1914, pour nous trouver le 2 août, à nos postes de mobilisation. Le terrain où était l'arche d'essai, mes notes et mon matériel, fut remis aux militaires.

Quand je revins en 1919, je me trouvais devant un énorme dépôt de mâchefer.

Mon travail des années antérieures à 1914 était anéanti. »

Réalisation du Tirant- Buton:

Heureusement, les réalisations bien pensées, bien réalisées et, qui plus est, ensevelies sous 1,5 m de remblais, survivent aux turpitudes guerrières des hommes!

C'est ce qui s'est passé pour le tirant-buton dont je vais décrire maintenant la réalisation pratique de sa **précontrainte d'avant-garde, en totale liberté sans aucune contrainte à caractère réglementaire**, et pour cause, puisqu'il s'agissait d'une création originale. Voici la source:

« Mon terrain de fondations ne valait rien et, du seul point de vue des charges verticales, je dus le consolider par des pieux. Mais, depuis bien des années déjà, en fait depuis les leçons de Rabut, (En particulier la visite avec l'École des P et C du chantier de construction des consoles au dessus des voies de St Lazare, rue de Rome à Paris) « j'étais hanté par l'idée de précontrainte »: « je l'utilisai pour relier les deux culées par un tirant de 150 dm² de section environ, précomprimé entre les deux culées, sollicitées à se rapprocher l'une de l'autre par une force permanente de l'ordre de 2500 tonnes fournie par plusieurs centaines de fil d'acier tréfilés de 8 mm, à haute limite élastique et tendus par paires au voisinages de celles-ci, puis ancrés par des clavetages insérés entre les deux fils de chaque paire.

Conçu en 1907 et construit au cours de l'été 1908, ce tirant est donc bien l'ancêtre de tous les ouvrages en béton précontraint. »

La précontrainte du Tirant-Buton:

Je ne peux pas commencer une description technique de ce thème précis, sans vous faire partager l'émotion qui fut la mienne lorsque je fis la première « boutonnière » exploratrice dans le béton du tirant.

Sur la culée Est, l'articulation était dégagée de la terre qui l'enveloppait, j'avais joué de la pelle, de la truelle et du balai pour figner, observer si c'était bien ce que nous disaient les textes, un coin du tirant apparaissait mais rien à cet endroit, ni dans la culée, ne laissait transparaître une trace d'organe de précontrainte.

À genou sur le tirant je sonnais à petits coups de marteau la surface, et soudain il sonna « creux » ! Un vide que j'explorais et soudain ma pointerolle s'enfonça. Je dégageais un éclat de mortier et c'est du sable blond qui apparut ! Enigme vite résolue car **sous le sable apparut une nappe de fils de 10 mm tendus, bien parallèles avec peu d'oxydation !** **Euréka**, je venais de découvrir un petit bout de la précontrainte du tirant, sans autre protection que du sable et un cachetage de la gorge avec du mortier assurant une étanchéité à l'air ! Trente ans après, en relatant cette exploration, je suis encore tout ému et je pense que vous partagez cet émoi. C'était **tellement en contradiction** avec tout ce dont nous débattions dans les commissions **d'experts de la précontrainte et des produits de protection**. Et **pourtant, elle est là toujours tendue** pour supporter l'arche !



Réalisation du Tirant- Buton, suite 1 :

Décrire et analyser comment la partie « vitale » du tirant a été réalisée en 1907 serait fondamental pour interpréter à partir de l'expertise de 1993 ce que l'on peut espérer de sa pérennité.

Les sources, qui sont multiples et non concordantes :

- E. Freyssinet: «force permanente de l'ordre de 2500 t fournie par plusieurs centaines de fils d'acier tréfilé de 8 mm»
- E. Freyssinet: « ancrer un fil ... sous les 70 kg/mm² de l'arche d'essai de Moulins »
- P. Lebel (jubilé de E. Freyssinet: « Le tirant de cette voûte était un prisme de béton traversé dans le sens de la longueur par 1200 aciers de 10 mm, non adhérent au béton ... »

Les erreurs : le fil d'acier tréfilé a un diamètre de 10 mm, la résistance à rupture mesurée est de 62 kg/mm² ; il paraît difficile de les tendre à 70 kg/mm² !

Le doute: ancrer 1200 fils par groupe de 2, soit 600 ancrages, c'est certainement plus facile à dire qu'à faire :

- Première remarque : Le tirant a été construit en 1908 par un Freyssinet qui n'est pas celui qui commente en 1949 ; celui-ci connaît alors toutes les servitudes qui accompagnent la connaissance de la véritable force de précontrainte. Pour revenir à la situation 1908, nous devons à partir d'une tension initiale à 85% de la contrainte à rupture mesurée en 1993, en sachant que c'est la même (à peu de choses près) que celle obtenue à partir du fil \varnothing 11, tréfilé à 10 mm pour augmenter sa limite élastique, et que Freyssinet connaissait certainement, car c'était le résultat d'une transformation qu'il avait voulue !

À cette valeur d'effort nous appliquerons les pertes immédiates qu'imposent à la fois la technologie de tension (perte de tension lors du transfert de l'effort depuis le vérin de traction à l'organe d'ancrage) et raccourcissement du tirant mis en compression par application de l'effort des fils tendus : l'effort de précontrainte.

Réalisation du Tirant- Buton, suite 2 :

- Deuxième objection: disposer 600 ancrages sur la face de la culasse qui va transmettre l'effort de compression au tirant présente plusieurs difficultés :

- d'abord il faut épanouir le faisceau des 1200 fils depuis les gorges dans lesquelles ils sont disposés jusqu'à l'arrière de la culasse où ils sont ancrés 2 par 2,
- il faut les isoler du béton de la culasse (à l'époque, je pense que Freyssinet les a enrobés par groupe de 2 dans du papier bitumineux pour que, pendant la tension, ils puissent glisser par rapport au béton),
- il faut rappeler qu'un fil \varnothing 10 est raide, que transporté en bobine il n'est pas auto-dérouleur (tendus pendant 85 ans, lorsqu'on a prélevé 2 échantillons de 3 m ils avaient une courbure importante,
- enfin, loger 600 ancrages de 40x50 mm de face d'appui, assez écartés pour répartir la pression sur le béton de la culasse, occupe en première approximation une surface de 3 x 1 m et donc entraîne des déviations de fils très importantes qui, outre que ces fils sont difficiles à mettre en place à cause de leur raideur, entraînent des pertes par frottement très importantes (qui s'ajoutent à celles déjà évoquées).

Compte tenu de ces deux objections, dues sans doute à la mémoire des témoins et au mélanges consécutifs à fil \varnothing 8 et à fil \varnothing 10 mm, il me semble qu'il faut s'en tenir à la force initiale de 2500 t et fil \varnothing 10 que l'on a expertisé pour tenter de décrire ce que pût être la construction du tirant-buton, sa mise en précontrainte initiale, sa valeur en 1993 et ce que l'on peut penser de son devenir.

Réalisation du Tirant- Buton, suite 3 :

Hypothèses:

- Effort de précontrainte initiale permanente: 2500 tonnes,
- Acier \varnothing 10 mm, résistance à rupture 620 MPa, tension initiale à 527 MPa (environ 85% rupture)

Analyse de ces données:

- tension initiale appliquée par le vérin sur une paire de fils: 527 MPa, $2 \times 78,5 \text{ mm}^2$, soit 82,8 kN.
- L'allongement brut des fils de 55 m de longueur sous cette tension est de 145 mm.

Pertes de tension immédiates: elles ont 2 origines:

- **le coincement conique** se fait moyennant un déplacement des fils, opposé au sens de la tension: par expérience, il se traduit par une perte d'allongement dont l'ordre de grandeur est de 10mm.
- **le raccourcissement** entraîné par la mise en compression du tirant; c'est une notion dont il est difficile de saisir l'importance progressive qui n'est réalisée totalement qu'après la tension de la dernière paire de fils tendus.

Ce que doivent bien comprendre les auditeurs, c'est qu'après tension à 82,8 kN de la seconde paire de fils, le béton du tirant se raccourci de 0,17 mm et que ce raccourcissement affecte la 1^e paire tendue et donc détend les 2 fils précédents de cette valeur ce qui, reproduit jusqu'à la tension permanente de 2500 t, fait une détension des 2 premiers fils de 53 mm! Seule la dernière paire aura la tension totale et donc on retiendra comme perte d'allongement moyen pour l'ensemble des fils la moitié soit 26,5 mm.

La tension moyenne de chaque paire de fils résulte donc d'un allongement de $145 - 10 - 26,5 = 108,5 \text{ mm}$, soit un effort de 6,2 t/paire, soit pour obtenir **la force permanente de 2500 t, 403 paires, soit 806 fils.**

Réalisation du Tirant- Buton, suite 4 :

Par contre, la mise en précontrainte s'accompagne d'autres pertes, les pertes différées dans le temps. Et, celles là, Freyssinet ne les connaissait pas ! Les découvrir n'était pas le but premier de l'Arche mais il n'empêche que : « Aussitôt la voûte d'essai terminée, j'organisais l'enregistrement continu des déplacements des articulations et de plusieurs points de l'intrados ... », il voulu que la grande éprouvette donne des informations sur la façon dont l'arche se comportait dans le temps.

Les déformations différées : elles concernent l'acier et le béton.

- **déformation différée de l'acier**: elle a pris le nom de **relaxation**. Il s'agit de la perte de tension avec le temps, à longueur constante de l'élément tendu. Étudiée scientifiquement par les métallurgistes à partir des années 70, cette stabilisation du réseau cristallin de l'acier entraîne sur les aciers de précontrainte actuel dont la résistance à rupture est de 1800 MPa, une perte de 2% à 1000 heures. Dans les années 30, cette perte était de 10% pour des aciers de résistance 1200 MPa. Cette perte étant très liée à la teneur en carbone élevée de ces aciers qualifiés de "à haute limite élastique", l'acier utilisé pour le tirant qualifié de "acier doux" tréfilé avait sans doute une perte beaucoup plus faible que je prends forfaitairement égale à 5%. Cette perte de tension se traduit par un défaut d'allongement de $0,05 \times 108,5 = 5,5 \text{ mm}$.

- **déformation différée du béton**: c'est une découverte de Freyssinet, quelques années après la construction de l'arche et Michel Placidi va vous en parler longuement. Le tirant n'a pas attendu la découverte, il l'a subi ! Donc il faut la prendre en compte dans le calcul des pertes ; forfaitairement je prends une **perte par fluage du béton** de 0,04 mm/m de tirant soit 20 mm de raccourcissement et donc 20 mm de perte d'allongement des fils de \varnothing 10 mm.

Réalisation du Tirant- Buton, suite 5 :

Après l'analyse de toutes les pertes qui accompagnent obligatoirement la mise en précontrainte d'un élément de structure en béton, on a tous les éléments pour définir ce que put être la force de précontrainte appliquée au tirant-buton dans l'hypothèse proposée par Freyssinet en 1949 : « **une force permanente de l'ordre de 2500 t fournie par plusieurs centaines de fils tréfilés** », les fils tréfilés étant ceux découverts en 1993 : \varnothing 10 mm, tendus à 85% de la résistance limite ultime vraie (620 MPa), soit 527 MPa.

Les résultats sont les suivants :

- effort théorique de mise en tension: 3400 tonnes,
- effort effectif après pertes immédiates: 2500 tonnes (par Hypothèse),
- effort permanent après pertes différées: 2087 tonnes (après quelques années, sauf intervention d'autres phénomènes physiques, corrosion en particulier puisqu'il n'y a pas de protection efficace.
- de l'allongement initial des fils de 145 mm, il ne reste après les pertes diverses que 82,5 mm !

L'importance de ces pertes sur cet ouvrage mythique justifie parfaitement ce qui sera la base des principes adoptés à partir de la précontrainte brevetée en 1928, des **aciers à très haute limite élastique** (Freyssinet a commencé avec des aciers à 100 kg/mm² de limite élastique, on est actuellement à 160 kg/mm²) tendus au voisinage de cette limite car **bénéficiant de ce coefficient de sécurité automatique**, les pertes de tension instantanées et différées !

Ceci a dû vraisemblablement se passer ainsi en 1908.

Le Tirant-Buton en 1993:

Recherche de la force de précontrainte résiduelle du tirant après une période de vieillissement de 85 années.

Les mesures conduites par le LRPC de Lille ont été faites par la Méthode de l'Arbalète sur fils tendus et par mesure directe du raccourcissement d'un fil de 3 m de longueur prélevé pour expertise métallurgique.

1: Méthode de l'Arbalète:

- Effort moyen 10,40 kN (14 fils mesurés-42 mesures)
- Fils fortement corrodés (2) Moyenne 7,5 kN
- Moyenne des 12 autres: 11,30 kN

2: Raccourcissement élastique après coupe:

- Base de mesure: 2498,7mm,
- Raccourcissement moyen (8 fils): 0,94mm.

3: Contrainte résiduelle dans les fils:

- La contrainte résultant de l'effort moyen est de 132 MPa, c'est une valeur par défaut.
- La contrainte moyenne est de 188 MPa, c'est une valeur par excès car les fils corrodés localement se raccourcissent plus.

4: Conclusion: La moyenne pondérée des résultats ci-dessus conduit à:

- Contrainte résiduelle moyenne: 150 Mpa,
- Effort résiduel moyen: 12 kN
- **Précontrainte résiduelle pour 806 fils : 1000 tonnes !**



CONCLUSIONS et DISCUSSIONS

On a montré précédemment que compte tenu des incertitudes sur des données parfois contradictoires qu'il était très difficile d'avoir des certitudes ; la mémoire humaine a des limites et quand elle a été mobilisée dans les années 50, une période euphorique pour le développement de la précontrainte et la gloire pour son inventeur, elle a pu faillir. La confusion entre diamètres de fils par exemple : 1200 corrigé par le rapport des sections des fils 8 et 10 conduit à 765 fils pas très loin du nombre de fils déduit de l'analyse des efforts, 800 !

Cependant, il y a quelques certitudes qui permettent de bâtir une stratégie pour le futur de l'Arche :

- Bien que l'élaboration métallurgique des fils (élaboration par la voie lingot et teneur en phosphore élevée révélée par l'analyse) soit favorable à une relativement bonne résistance à la corrosion, il faut quand même ne pas perdre de vue que **l'acier n'a pas de protection** autre que l'abri de l'air et une humidité ambiante réduite à la porosité du béton du tirant.

- Sur les 14 fils sur lesquels ont été faites des mesures d'effort résiduel, 2 étaient fortement corrodés, soit 14% ! Ils étaient sur le dessus des gorges ; était-ce favorable, défavorable ? Ce n'est qu'un constat qui indique que la corrosion est bien installée et que si l'on souhaite limiter son évolution, il faut sans doute **encapsuler l'arche dans une ambiance sèche et pauvre en oxygène**. Par ailleurs, l'expertise du Laboratoire des Monuments Historiques pour la conservation de l'arche risque de conclure à la même mesure conservatoire pour limiter la carbonatation du béton.

- Quelle que soit la valeur statistique du prélèvement, il faut bien avoir présent à l'esprit que le relativement bon état de la conservation de l'acier de précontrainte du tirant relevé par l'expertise de 14 fils, relève **quand même de l'exception, que la raison commande de tempérer et de ne pas en rester à un optimisme béat!**

CONCLUSIONS et DISCUSSIONS suite:

- En effet, la **perte de tension en 85 ans** est tout de même de **1500 tonnes**. Il reste pour ne pas **compromettre la stabilité de l'Arche que 600 tonnes de réserve d'effort**, toutes choses étant égales par ailleurs, soit **34 années avant que la poussée de l'arche commence à faire bouger les culées et donc qu'elle commence à s'effondrer !**

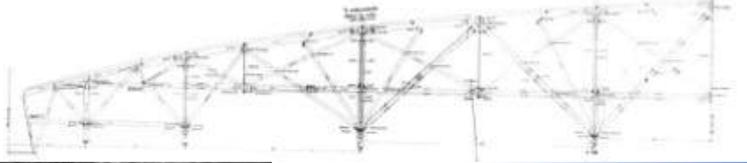
Ceci constitue évidemment un pari sur la vitesse de corrosion des fils; actuellement c'est donc l'équivalent de 4 fils de 10 mm qui disparaissent chaque année!

- **Alors que faire ?** Le minimum que l'on puisse envisager est d'essayer de ralentir cette vitesse. Les deux agents responsables de cette corrosion, sont d'une part l'oxygène de l'air et peut-être celui qui apparaît dans le phénomène de corrosion sur les fils en présence d'humidité du sable dans les gorges du tirant, et d'autre part l'humidité du sol qui enveloppe le tirant.

- **Comment le faire?** Plusieurs solutions sont possibles avec une efficacité certaine; la solution viendra d'un collège d'experts en accord avec les architectes en charge du programme immobilier sur le quartier de l'arche.

- **Quand le faire?** La génération actuelle sait qu'elle devra s'en occuper avant de disparaître et de risquer de faire disparaître ce **monument historique, témoin d'une formidable aventure humaine dans le domaine de la construction du XXe siècle!**

résultats de l'essai de décentrement de l'Arche satisfaisants
la construction du pont peut commencer sur son cintre :
3 travées de 68 – 72,50 – 68 m de portées



Dessin original du cintre établi par Eugène Freyssinet



grande attention sur la qualité des bétons :
formulation (*qualité et quantité de ciment,*
nature des agrégats, quantité d'eau)
fabrication et coulage (*taper sur les coffrages*)

Derniers bétonnages des voûtes
au printemps 1910
Les essais de chargement durant l'été 1910
furent un triomphe, même si ce succès généra
quelques déceptions chez certains...

Mais... quelques mois après la mise en service du pont, les trois arcs s'affaissaient. Au printemps 1913 le niveau des clefs était descendu de 13 cm, conséquence du phénomène, méconnu jusqu'alors, de la déformation différée des bétons sous charge.

Pour sauver l'ouvrage, Eugène Freyssinet va utiliser les vérins de décentrement pour exercer une poussée horizontale en clef de voûte, écartant les deux moitiés de l'arc et ainsi les ramener progressivement puis définitivement à leur position initiale.

Ce sauvetage est déterminant dans la réflexion d'Eugène Freyssinet sur la possibilité d'obtenir une compression permanente du béton malgré ce « **fluage** ». Il faudra néanmoins attendre 1928 pour qu'il dépose sa demande de brevet sur le béton précontraint.



Après dépose de l'ancien pont suspendu, le pont du Veudre, fierté d'Eugène Freyssinet, tel qu'il servit durant 30 années



Dynamité en septembre 1944 par la Résistance, pour empêcher les troupes allemandes de remonter renforcer le front de Normandie à la suite du débarquement du 6 juin 1944

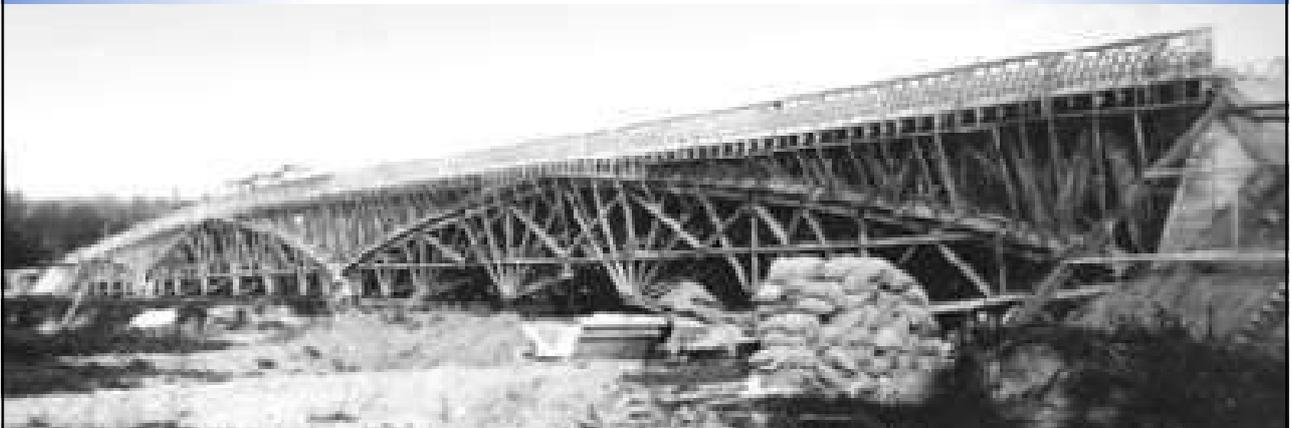
Il est reconstruit en 1948, en béton armé, avec une travée centrale isostatique posée en cantilever



Pont Boutiron

Trois travées de portées 67 m – 72 m – 67 m.

Chaque arc comporte à sa naissance des « articulations Freyssinet » de section béton rétrécie fretté
Le tablier est coulé sur un cintre général en bois et le décintrement est effectué par vérinage à la clé
Parapets préfabriqués en béton ouvragé et ajouré



Ensemble du cintre en bois pour le bétonnage du tablier

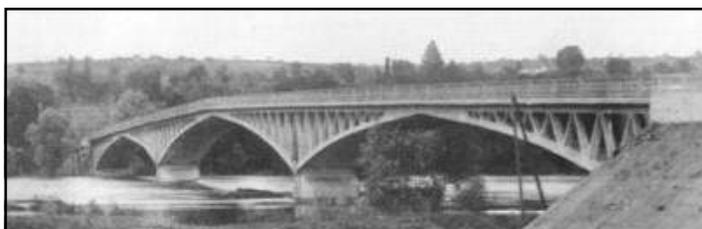
Grave incident au cours de la construction

Dans la soirée du 3 juin 1913, les hourdis inférieurs formant les arcs étant coulés, les triangulations formant les tympans et les hourdis supérieurs formant la chaussée étant coffrés et ferrailés, qu'il n'y avait plus qu'à couler le béton, une très violente crue se produisit qui envoya dans les cintres toutes sortes d'objets flottants, éléments de hangars, de palissades et de foins récemment fauchés.

Sous la pression des eaux retenues par ce barrage qui s'était formé, les palées soutenant le cintre se déversèrent et la charpente se déforma fortement, sans toutefois s'effondrer complètement.

Après avoir tant bien que mal comblé les principaux désordres provoqués dans le lit de la rivière, Eugène Freyssinet écrit ce qu'il a fait : *« avec mes vérins de décintrement et des vérins de relevage, je contraignis toutes mes têtes de palées à refaire un parcours exactement inverse de celui qu'elles avaient fait sous l'action de la crue. Dans un vacarme de bois brisés, voûtes, coffrages et armatures reprirent très exactement leurs formes initiales. Je donnai alors l'ordre de bétonner sans arrêt, jour et nuit, car j'avais une peur terrible de la seconde crue qui, d'après l'histoire de la rivière suit souvent une première crue d'été. Tous, jusqu'aux dessinateurs et aux comptables, furent embauchés pour le damage du béton. La deuxième crue vint, comme je l'avais craint, mais le pont tint bon ».*

Après décoffrage et examen attentif de la structure, aucune trace ni de fissure ni de déformation permanente ne put être décelée. Le pont Boutiron n'a plus bougé depuis plus de cent ans....



Le Pont Boutiron le jour de ses épreuves en 1913

et le même 110 ans après en 2023 :



Enseignements tirés de ses neuf années passées à Moulines

- . Conscience de l'importance de la fabrication du béton (composition, mise en œuvre) dans sa qualité et sa durabilité
- . Importance des formes de la structure dans son fonctionnement et le cheminement des efforts et des contraintes
- . Invention du décintrement des arcs par vérinage à la clé
- . Découverte du Fluage (qui ne sera officiellement admis que 20 ans plus tard)
- . Premiers balbutiements de la notion de « préfabrication » des pièces en béton
- . Première application d'une « sorte de précontrainte » avec le tirant de la poutre d'essai



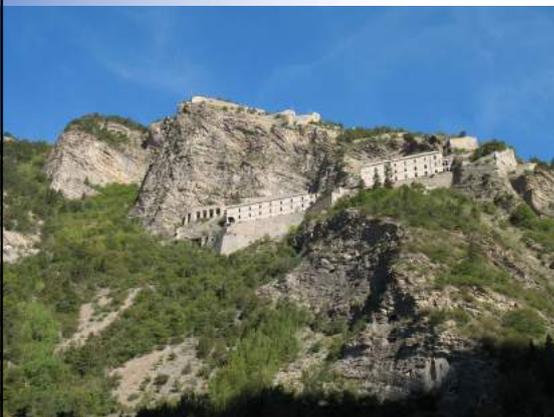
En 1914, François MERCIER s'est associé à Claude LIMOUSIN, un des camarades de promotion d'Eugène FREYSSINET à l'École des Ponts et Chaussées, association qui avait conduit à la création de la « Société Mercier, Limousin et Compagnie » dont Eugène FREYSSINET assure alors la Direction Technique.

28 juin 1914 – Attentat de Sarajevo – La Première Guerre Mondiale est déclarée...

Tous les chantiers sont suspendus, et même ceux qui venaient d'être commencés sont interrompus.

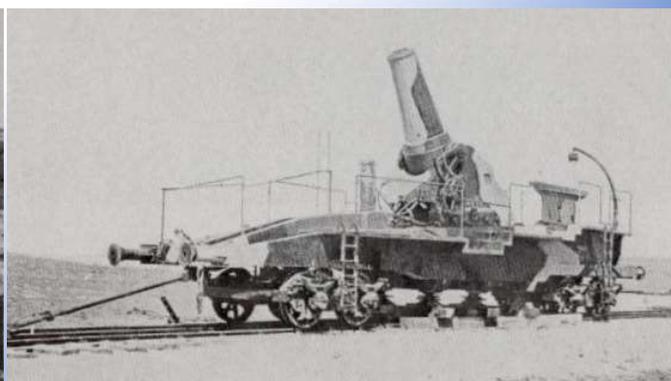
Mobilisé, Eugène FREYSSINET reçoit au mois d'août sa première affectation au 7^{ème} régiment du Génie à Grenoble :

il rejoint alors le fort de Tournoux au-dessus de Saint Paul sur Ubaye, après Barcelonnette, dans les Alpes de Haute Provence, pour assurer la défense de la frontière italienne.



Mais il ne reste pas longtemps dans les Alpes, puisque dès novembre 1914, il est muté au 5^{ème} régiment du Génie dans le Nord, pour être mis à la disposition du Commissaire militaire à la Commission du Réseau nord, région dans laquelle de grands besoins de construire des ouvrages nécessitaient le recours à des spécialistes du béton, du fait de la grande pénurie d'acier qui régnait alors, ce matériau, l'acier, étant réservé à la fabrication des armes.

En janvier 1916, une nouvelle décision met Eugène FREYSSINET à la disposition de l'Entreprise Mercier, à Moulins, afin de réaliser la construction en béton armé de grands ateliers de chargement, selon les procédés qu'il avait lui-même mis au point. Là, Eugène FREYSSINET conçoit et réalise un très grand nombre d'ouvrages, à des fins militaires, « *j'ai fait des hectares et des hectares d'ateliers de chargement, de halles, d'usines, de hangars pour toutes destinations* ». Il a même construit des « affûts de canon » montés sur rails en béton armé, l'acier étant réservé pour la fabrication des armes.



Au milieu de cette année 1916, peu après le retour d'Eugène FREYSSINET dans l'entreprise, un différend profond et grave opposa les deux associés, François Mercier et Claude Limousin, ce qui conduisit François Mercier à se séparer de Claude Limousin et à quitter l'entreprise. La nouvelle entreprise prend alors le statut de Société Anonyme, sous le nom de « Société Limousin et Cie, Procédés Freyssinet », et transfère son siège social à Paris. Claude Mercier mourra d'ailleurs en 1920

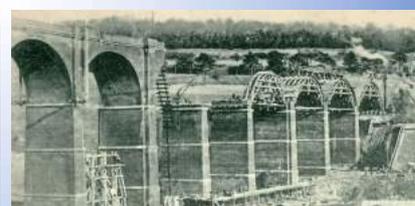
Au cours de ces quatre années de guerre, Eugène FREYSSINET aura construit plus de 200.000 m² de voûtes de couvertures en béton armé, de planchers, dont certains capables de supporter des surcharges extrêmement élevées, ce qui était très rare à l'époque, de bâtiments, comme la Manufacture d'armes de Saint-Etienne, l'usine Schneider au Creusot, les Verreries du Centre à Montluçon, la Grande Aciérie de Caen, les hangars pour avions à Avord, près de Bourges, ou ceux à Istres, de nombreux ponts ferroviaires près du Quesnoy, dans le Nord, mais aussi des réservoirs d'eau, des silos pour minerais, des passerelles et des ponts, comme le pont de Laversine-sur-Oise ou la réparation du Viaduc de Poix.



Pont de Bequerel à Lille



Pont de Laversine sur Oise



Réparation du Viaduc de Poix près d'Amiens

En 1917 aussi, Eugène FREYSSINET imagine la vibration mécanique du béton afin d'améliorer, comme il l'avait déjà constaté, sa compacité et donc sa résistance. Il invente pour cela les **vibreurs électromagnétiques**.



Hangars pour avions à Istres



Usine Schneider au Creusot
poutre rail pour pont roulant de 100 t



Les Aciéries de Caen
Vue d'ensemble et intérieur de la nef



Verreries du Centre à Montluçon



Usine de construction de locomotives à Nantes

... et de nombreuses constructions
d'usines pour aider à l'effort de guerre



Manufacture d'armes de Saint Etienne

Dès la fin de la guerre, c'est donc avec Claude Limousin qu'Eugène FREYSSINET poursuit son parcours en entreprise.

Au cours de ces 10 années, entre 1918 et 1928, il construit de très nombreux bâtiments industriels, pour accompagner le redémarrage de l'activité après les quatre années de guerre :
grandes halles, usines diverses,

Les Mines de Saint Etienne, dans la Loire



Reconstruction des Verreries de Folenbray (Aisne) en 1921,
entièrement détruites pendant la guerre,
25.000 m² de bâtiments avec des voutes de 31 m de portée





Le chevalement de la Mine de Noyant d'Allier construite en 1923, un des premiers chevalements en béton armé

comme le chevalement et le carreau de la mine de Noyant d'Allier en 1923

ou celui du puits Chatelus de la mine de Saint Etienne

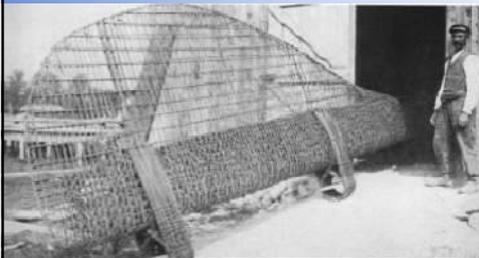


Ce même chevalement de Noyant, en 2023, cent ans après, intégré dans les bâtiments en béton armé et briques formant le carreau de la Mine



Echafaudage pour le coulage de la coque

Ferrailage du gouvernail avant son coulage



Ils font même aussi des chalands de mer en béton

De 1918 à 1921, pour palier au manque d'acier
Société installée à Grand Quevilly, près de Rouen
15 chalands de type « Léopard » de 55 m de longueur, déplaçant une jauge de 2.150 t
Construits à terre, puis soulevés sur des sacs de cuir que l'on remplissait d'eau (ancêtres des vérins plats)



Chaland de type « Léopard » lors de sa mise à l'eau dans la Seine

Nombre de ces ouvrages comportent généralement de grandes couvertures en voutes minces, parmi lesquels :

les Halles du Boulingrin, à Reims,

La couverture de la Gare de Reims



Les Halles du Boulingrin à Reims en 1928 ci-dessus, aujourd'hui ci-dessous

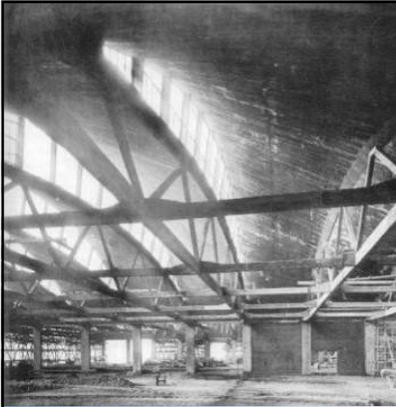


les Messageries de la Gare d'Austerlitz à Paris,



aujourd'hui classées monument historique et devenues la Station F

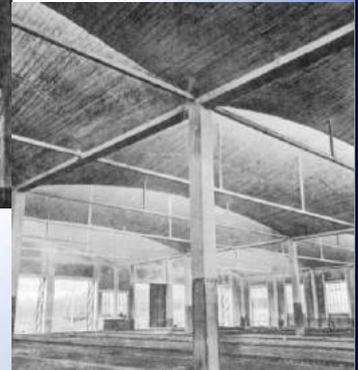




Compagnie Nationale des radiateurs à
Dammarie-les-Lys en 1928



Les ateliers de réparation
des chemins de fer à Bagnex
en 1928



Détails de la poutraison et des poteaux



... Mais aussi quelques magnifiques et remarquables ponts en arc en béton armé, repoussant chaque fois un peu plus loin le record du monde de portée de ce type d'ouvrage dont trois retiennent particulièrement notre attention :



le Pont de **Villeneuve sur Lot**, une travée unique comportant deux arches terminé en 1920



le **Pont de Tonneins** en 1922, comportant cinq arches de 46 m de portée surmontées d'autres arches de décharge,

le pont de **Saint-Pierre-de-Vauvray** sur la Seine en Normandie, en 1923, ouvrage de type bow-string qui permit à Eugène FREYSSINET de battre un nouveau record du monde de portée pour un pont en béton armé avec 131 m.



Le Pont de Villeneuve sur Lot

- . Concours lancé en 1912, pour un nouveau pont
- . en plein centre ville, largeur du Lot : 100 m
- . à proximité d'un pont des Cieutats (du Moyen-âge)
- . Eugène Freyssinet propose un pont à travée unique de 96,25 m de portée constitué de deux arcs
- . cintres installés en 1914 et arcs coulés, puis chantier arrêté pendant la guerre
- . chantier repris après la guerre et terminé fin 1919



Le Pont des Cieutats

construit en 1285, avec cinq petites arches, repris en 1620 avec sa « grande arche » de 35,30 m de portée, suite à l'effondrement de deux des premières arches suite à une crue en 1600



Vue d'ensemble du cintre

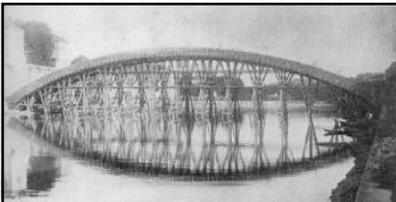


fig. 223 - Pont de Villeneuve-sur-Lot : le cintre



fig. 224 - Pont de Villeneuve-sur-Lot : les arcs en cours

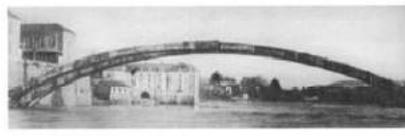
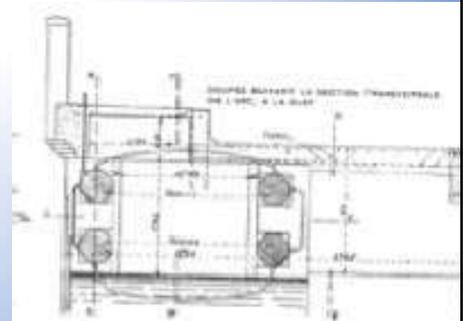
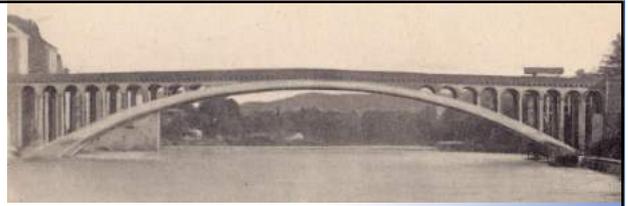
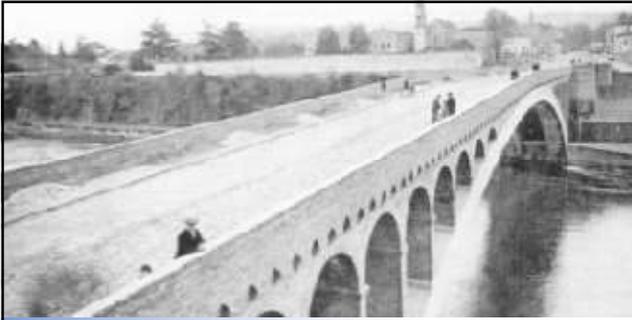


fig. 226 - Pont de Villeneuve-sur-Lot : les arcs démontés



Quatre vérins de 500 tonnes pour chaque arc
(indépendants pour « effacer » les déformations dues au poids propre, au retrait et au fluage)





Détails des arches secondaires
Vues de l'extérieur Vues de l'intérieur



Les deux ponts qui cohabitent en représentant deux époques

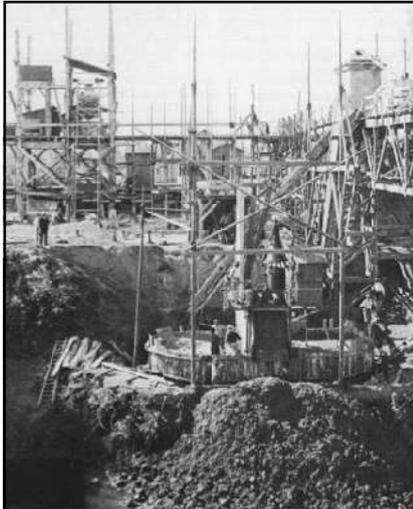
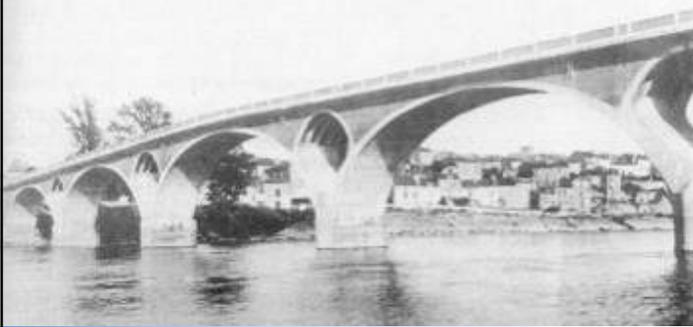
... et le Pont de Villeneuve sur Lot, aujourd'hui, 103 ans après :

Nouveau record du monde de portée de sa catégorie



le Pont de Villeneuve sur Lot représente un grand pas en avant dans l'évolution de la philosophie d'Eugène FREYSSINET et présente donc aussi un grand intérêt technique, prémonitoire de ce qui va transparaître dans la Précontrainte ...

le Pont de Tonneins
en 1922, qui comporte cinq arches de 46 m de portée surmontées d'autres arches de décharge,



Caisson de fondation
des piles centrales



Détail du cintre des
travées principales



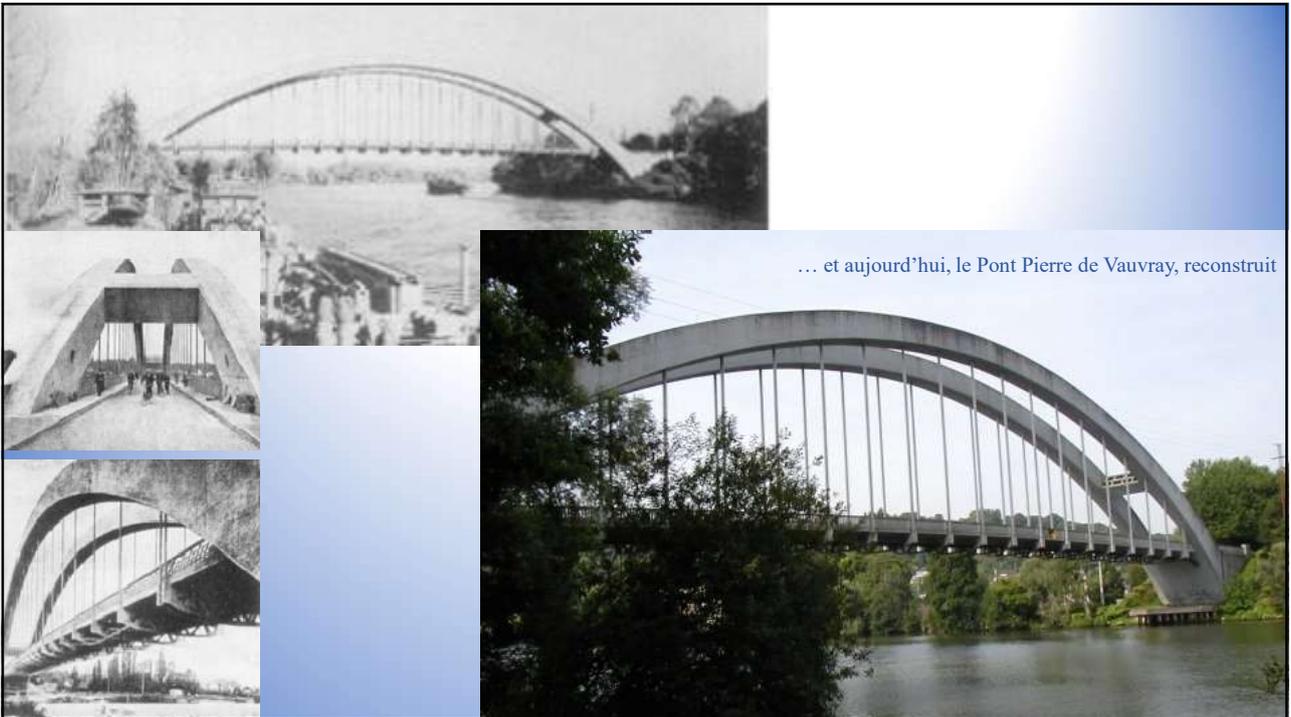
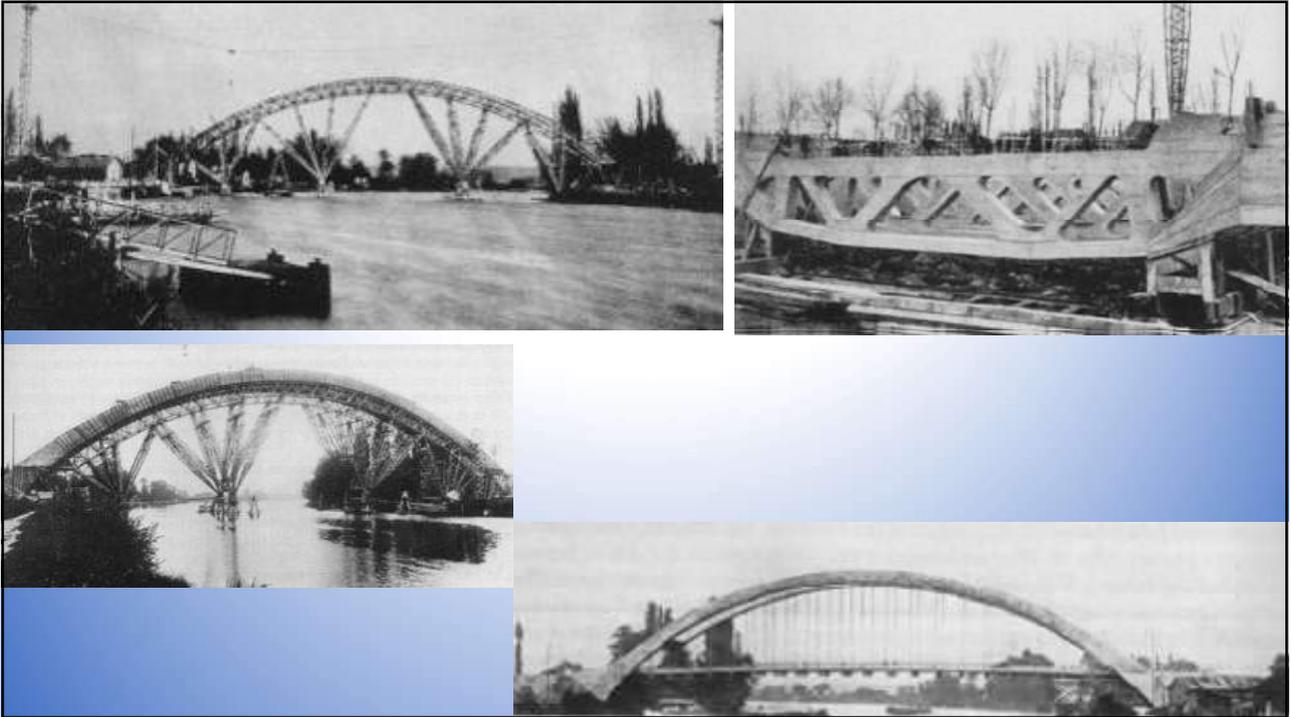


le Pont de Tonneins, aujourd'hui, 101 ans après :



le pont de **Saint-Pierre-de-Vauvray**
sur la Seine en Normandie, en 1923, ouvrage de type bow-string qui permet à Eugène FREYSSINET de battre un nouveau record du monde de portée pour un pont en béton armé avec 131 m.

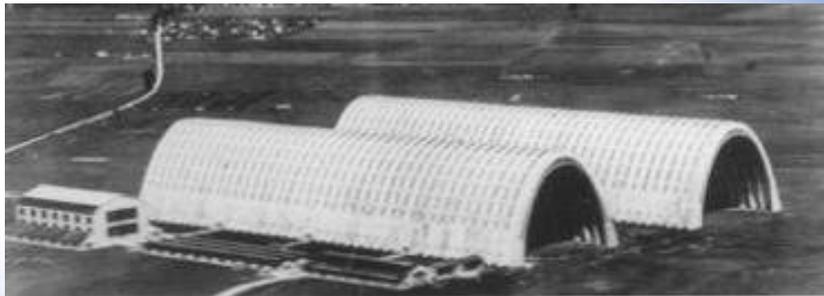




Pause café

Ainsi que deux ouvrages véritablement emblématiques :

. les **hangars à dirigeables d'Orly**



. le **Pont Albert Louppe**, sur l'Elorn,
entre Brest et Plougastel



Les hangars à dirigeables d'Orly

En 1920, un concours est lancé pour la construction de deux grands hangars pour dirigeables à Orly. Forts de l'expérience qu'ils avaient acquise en construisant ceux d'Avord, d'Istres et plus récemment ceux de Villacoublay, Eugène FREYSSINET et la Société Limousin répondent, et obtiennent le marché, grâce à un prix très inférieur à ceux des concurrents.

Il s'agit de deux immenses hangars parallèles, de 300 m de longueur chacun, formés d'une succession d'arcs de forme parabolique de 90 m de portée et 60 m de hauteur. Le prix avec lequel ils ont obtenu cette affaire est tellement bas, par rapport à la concurrence, qu'ils s'en inquiètent au point de penser qu'il y a peut-être eu une erreur dans l'estimation de leur avant-projet, d'autant plus que, très pris par d'autres projets, ils n'y avaient consacré que peu de temps.

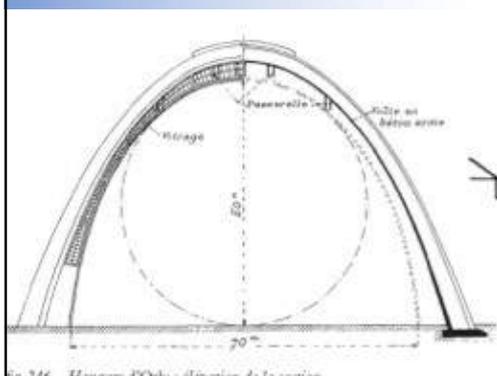
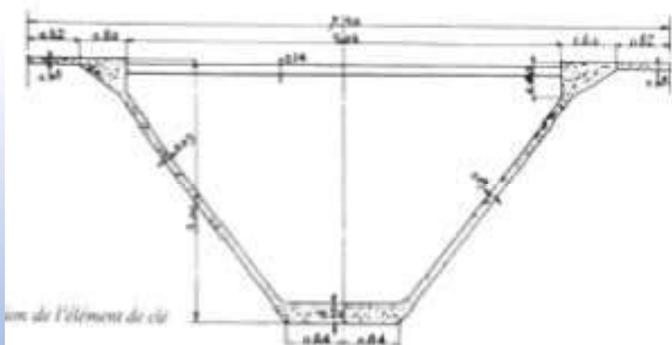
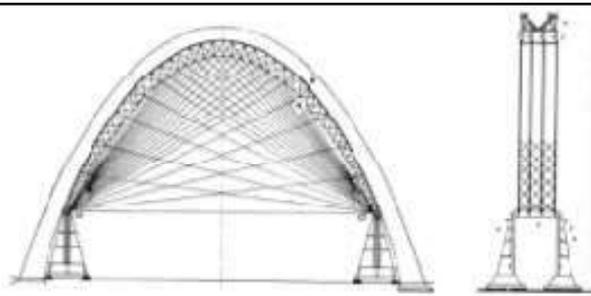


Fig. 246 - Hangars d'Orly - élévation de la section



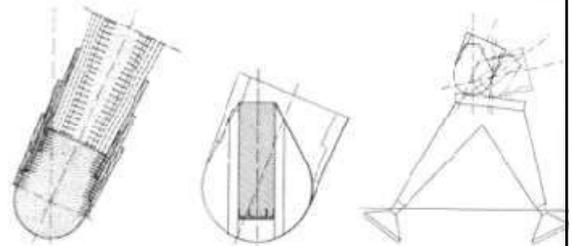
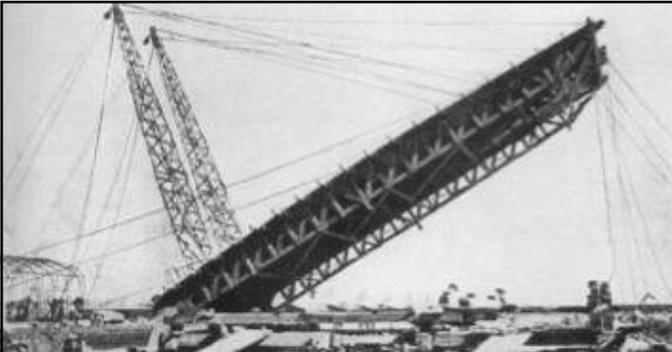
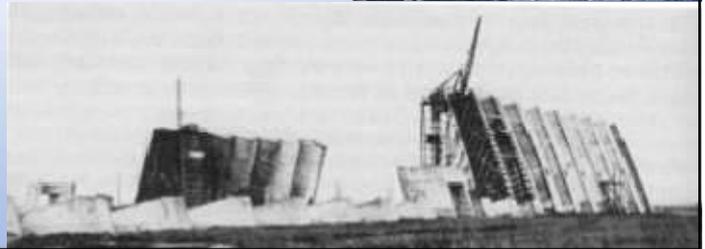
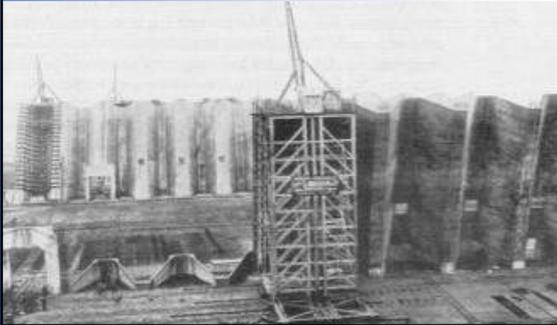
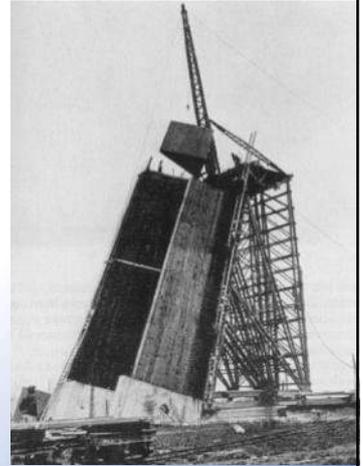
Eugène FREYSSINET le reconnaît : « Afin d'éliminer complètement cette crainte, je m'efforçai de réduire au maximum les coûts de construction. Après de nombreux essais, j'arrivais à combiner des formes jusqu'alors inemployées, susceptibles d'être réalisées avec des moyens mécaniques demandant peu de main d'œuvre et capables d'assurer une totale sécurité de l'édifice moyennant de faibles dépenses en matériel ».

Dans ces conditions, il met au point une série de changements fondamentaux qui firent que le projet final ne ressemblait que peu au schéma initial.



Chaque hangar est constitué de quarante arches s'élevant directement à partir du sol, dont « la forme parabolique, esquissée par son intuition, précisée par son calcul, dérivait de la fonction structurelle et des possibilités des matériaux et des moyens d'exécution ». Ces arches, formant nervure pour l'ensemble de l'ouvrage, de section rectangulaire évidée, étaient renforcées par des tirants à l'intérieur des voûtes pour améliorer le comportement général de l'ouvrage au vent.

L'ensemble fut réalisé en un délai très court, grâce à un outillage très ingénieux spécialement conçu pour ce projet : les amorces des arcs, sur une hauteur de 17 m, étaient coulées en place directement dans des coffrages se déplaçant sur des rails au sol. La partie centrale de chaque voûte était coulée sur un cintre unique en bois supportant le coffrage. Dès qu'une voûte était coulée, on descendait le cintre de 11 m et on le déplaçait horizontalement pour le mettre en position pour couler la voûte suivante.



Montage des éléments du cintre en bois cloués avec rotules en pieds



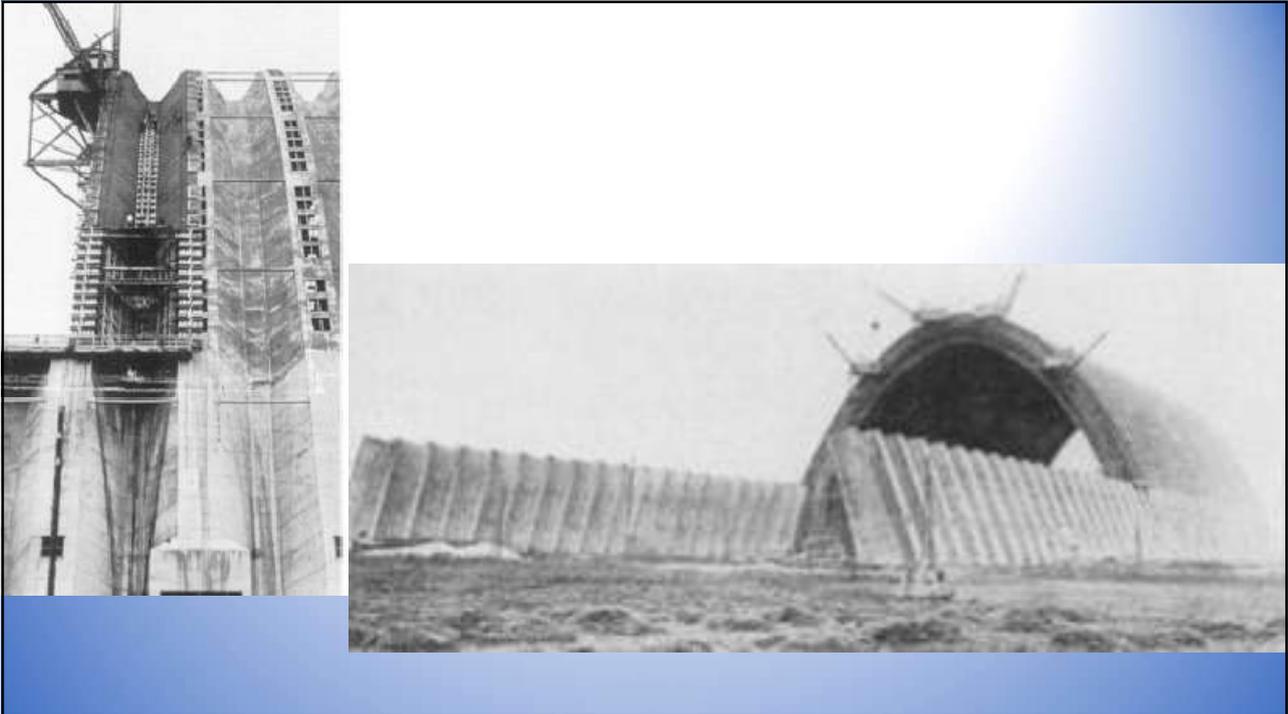


Assemblage des trois éléments du cintre et son équipement avec ses quatre grues et les coffrages



Décintrement et déplacement du cintre par ripage

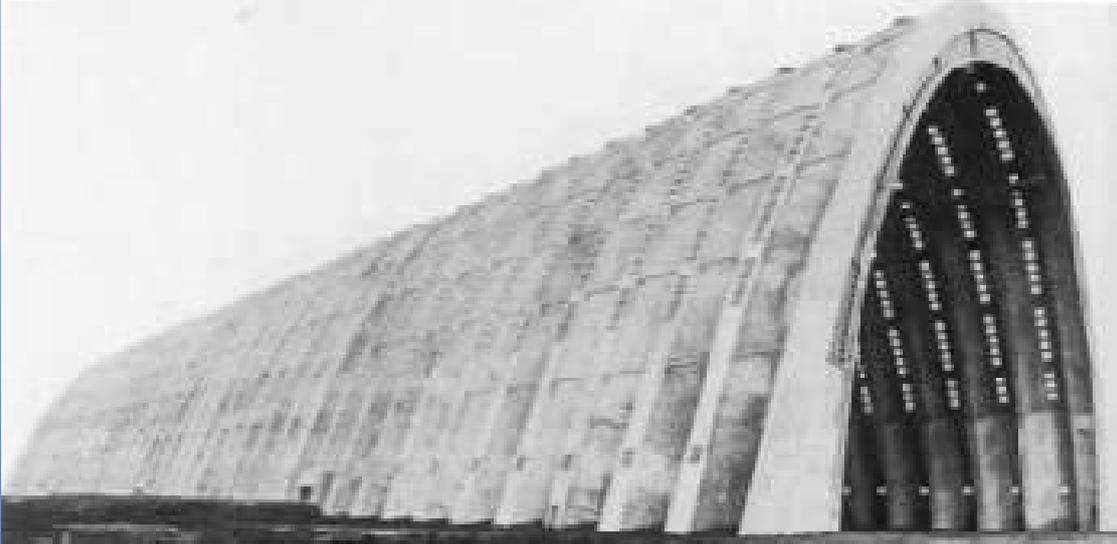




Bien que leur dessin ait été dicté principalement par des considérations techniques et technologiques (résistance de la structure et économie des matériaux et des méthodes de construction), le résultat obtenu en fut époustoufflant : Nul visiteur, en pénétrant dans cette immense nef aux dimensions impressionnantes, ne put ne pas être interpellé par cette sensation d'équilibre, d'harmonie, d'ordre et de beauté, et ressentir ce que l'on ressent devant une œuvre d'art parfaitement réussie.

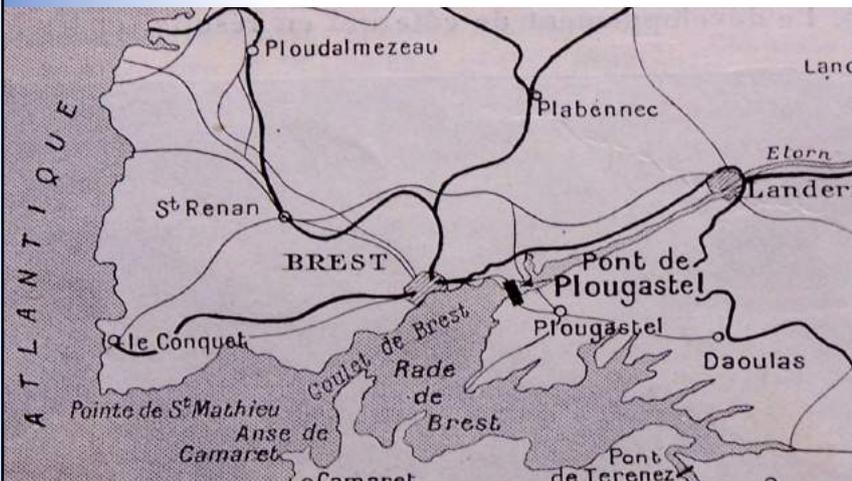


Outre le record du monde qu'elles ont détenu par leurs dimensions et par leur très faible ratio du volume de béton employé pour le volume utile de construction, malgré leur destruction lors d'un bombardement durant l'été 1944, les hangars d'Orly ont été et resteront une incontestable Œuvre d'art architecturale majeure du XX^{ème} siècle.



Le Pont Albert Louppe

Après plusieurs tentatives depuis 1904, qui n'avaient pas abouti, le 22 septembre 1922, décision par le G.G.29 de construire un pont sur l'estuaire de l'Elorn, au fond de la Rade de Brest



Largeur de la brèche : 600 m
entre Le Relecq Kerhuon au nord
et Plougastel au sud



... pour remplacer les anciens bacs à vapeur,
environnement difficile, vents violents, marnages importants,

Projet conçu par Eugène FREYSSINET et proposé par l'entreprise Limousin, retenu le 21 janvier 1924, grâce à l'obstination du Président du Conseil Général du Finistère, Monsieur Albert LOUPPE, malgré de nombreuses réticences des membres du jury

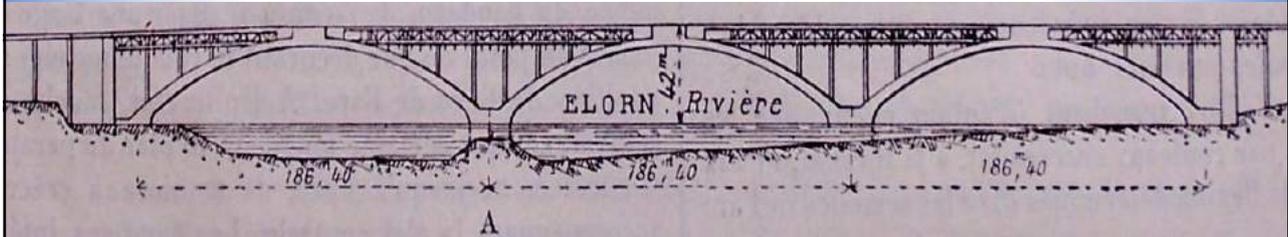


Fig. 3. — Élévation d'ensemble du pont sur l'Elorn (A, Basse du Prince russe).

- Six véritables « prouesses » caractérisent cet ouvrage :
- le choix de ses portées : 186,40 m (*record du monde de l'époque*)
- le tablier supérieur à double niveau
- les fondations de ses appuis en rivière
- la construction en encorbellement des amorces des arcs
- un « téléferique » spécial pour desservir le chantier
- le cintre en bois et son transfert d'une travée à la suivante

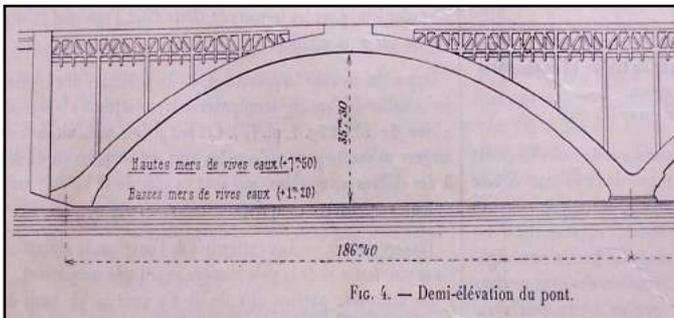
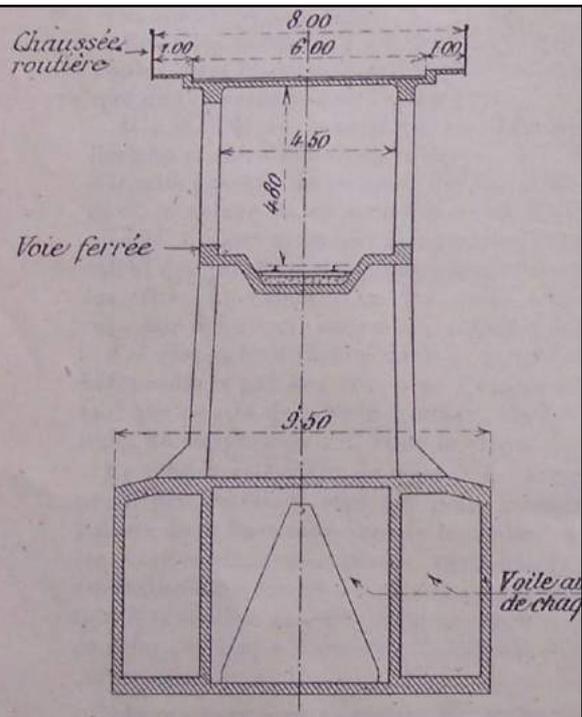
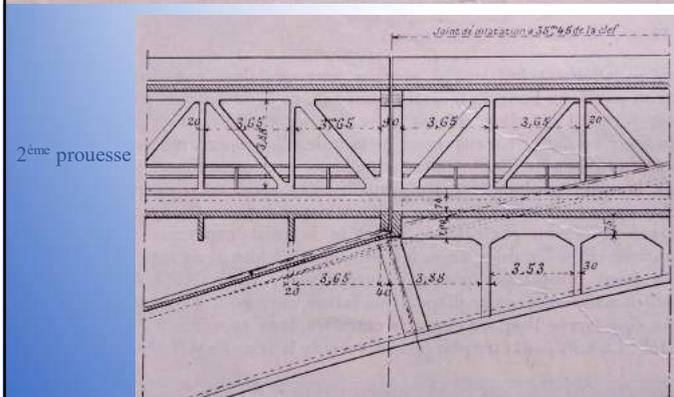
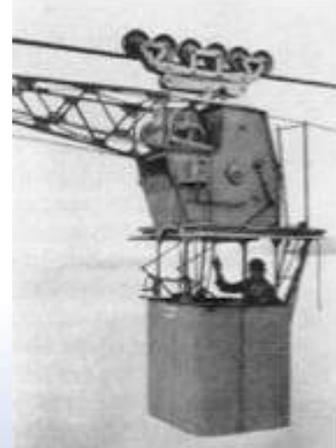
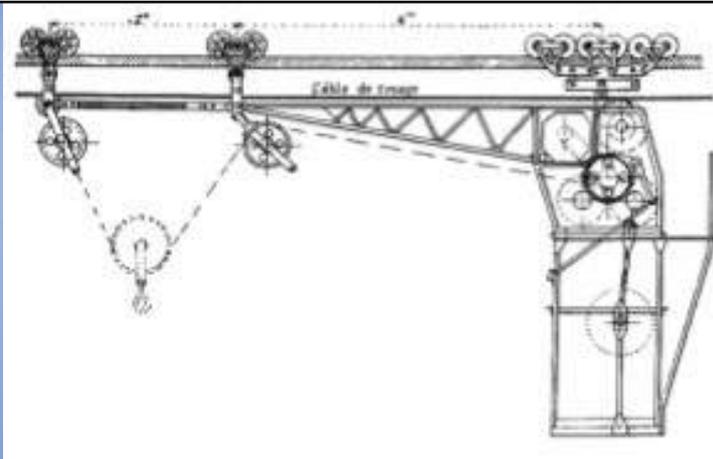
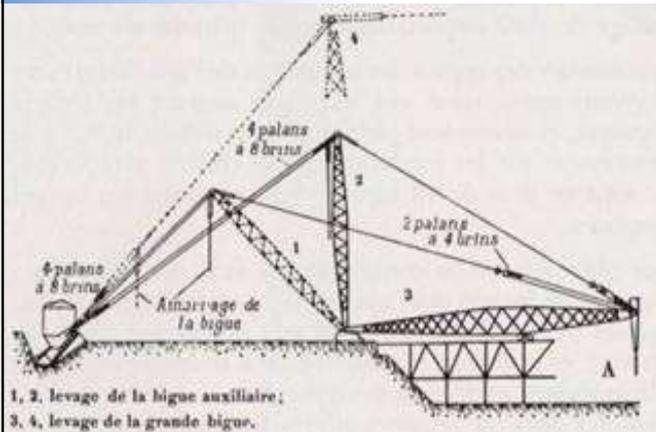
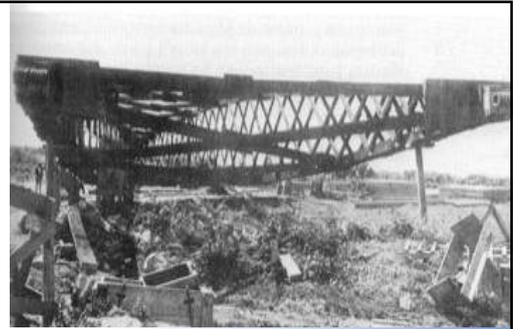


Fig. 4. — Demi-élévation du pont.



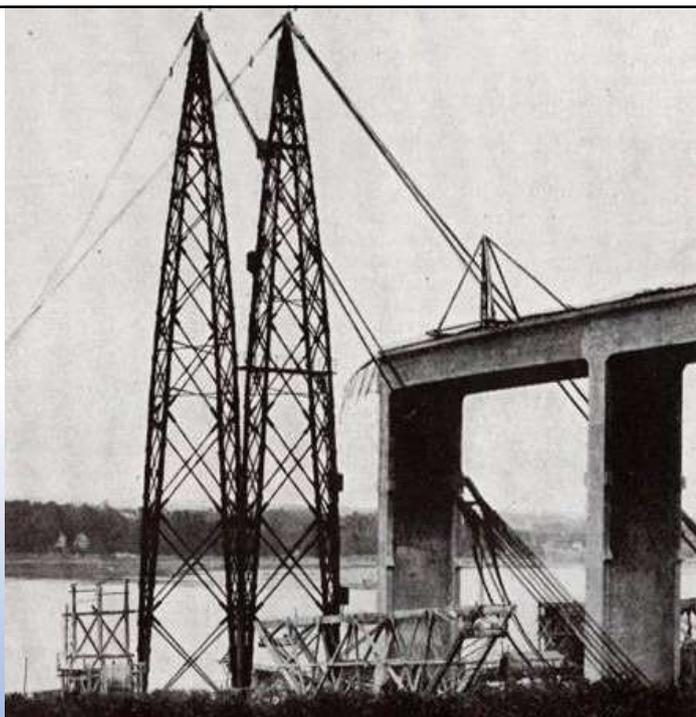
La 5^{ème} prouesse mise en œuvre pour la réalisation de cet ouvrage est le funiculaire imaginé par Eugène FREYSSINET pour alimenter le chantier en matériaux. Aucun engin de transport ou de manutention existant ne pouvant répondre à ces besoins, amener sur place plus de 25.000 m³ de béton, les armatures, mais aussi manutentionner les coffrages, avec rapidité, Eugène FREYSSINET imagine un transporteur spécial formé de deux câbles parallèles fortement tendus et portant chacun un chariot muni de treuils et une cabine de manœuvre. Sur chaque rive de l'Elorn, deux pylônes, distants l'un de l'autre de 680 m, eux-mêmes formés de deux bigues en bois cloués, de 55 m de hauteur,



Une nacelle permet à un grutier de surveiller en permanence la charge.

Ces deux blondins, capable de transporter une charge de 2 tonnes chacun (pouvant être doublée en les couplant) à une vitesse de 3 m à la seconde, ont été mis en service durant l'été 1926 et ont fonctionné avec une remarquable régularité et une grande efficacité, pour alimenter le chantier depuis les fondations jusqu'à la fin du tablier.

Les câbles porteurs dont la tension est assurée par un contrepois mobile de 120 tonnes se déplaçant sur un plan incliné.



La 6^{ème} grande prouesse de ce chantier est le cintre sur lequel étaient posés les coffrages des arcs. Ce cintre majestueux de 10 m de largeur, 150 m d'ouverture, en bois cloué, ayant nécessité 600 m³ de bois et 15 tonnes de clous, sous-bandé par des câbles métalliques tendus, a été construit en rive gauche de l'Elorn, côté Plougastel, sur deux chalands en béton de 35 m de longueur, chacun de ces pontons étant équipé de six treuils pour permettre son déplacement et son réglage.

Le 2 avril 1928, à marée montante, les chalands sont mis en flottaison. Le cintre est ainsi amené à l'emplacement du premier arc, en rive gauche, puis hissé contre les amorces d'arc, préalablement réalisées, « sans aucun appui en rivière ».



Construction du cintre en bois cloués sur la rive gauche de l'Elorn



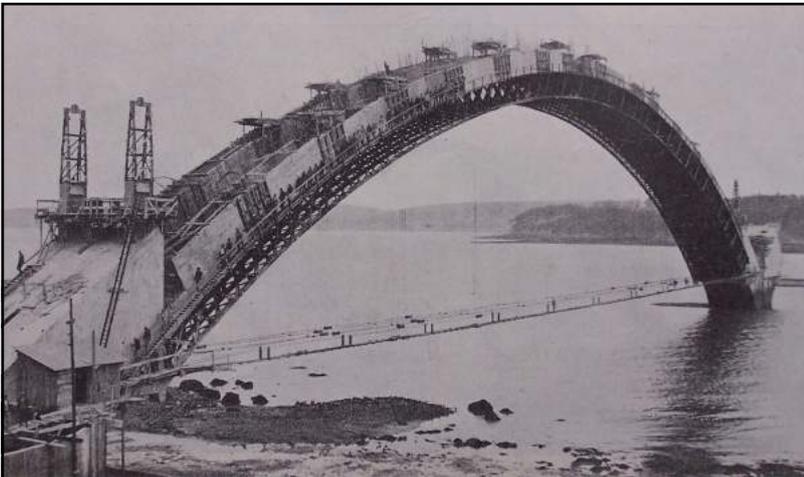
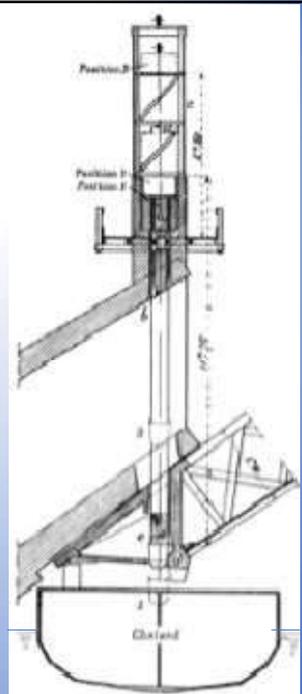
Installation sur le cintre d'un platelage supportant le coffrage



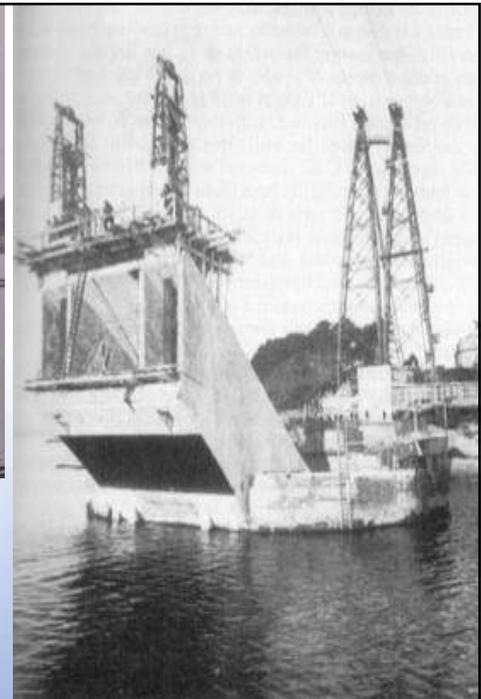
Mise en tension des câbles de sous-bandage puis mise en flottaison du cintre sur ses deux chalands

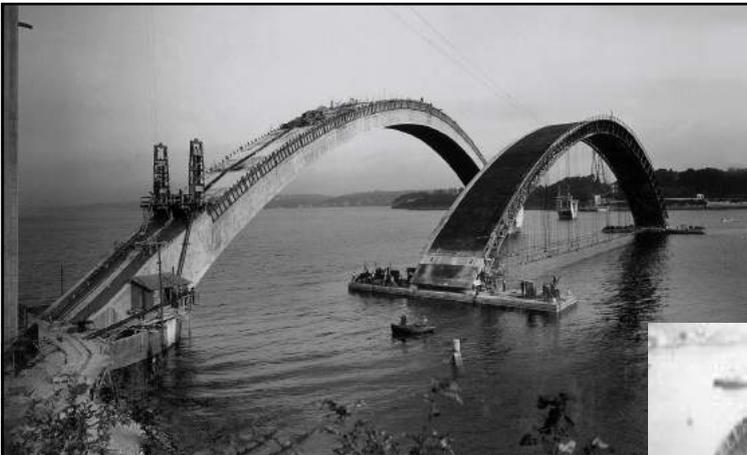
Un système très judicieux permet d'augmenter la tension des câbles de sous-bandage pour « déformer » le cintre vers le haut (de 15 cm) pour compenser sa flèche sous le poids du béton

Dispositif d'accrochage du cintre aux amorces de l'arc depuis le chaland



Cintre en place sur la première travée, coté Plougastel, coulage de l'arc par rouleaux successifs (dalle inférieure, parois et cloisons verticales, dalle supérieure) par plots alternés de façon à répartir au mieux et symétriquement la charge sur le cintre (ratio d'armatures dans les arcs : 23 kg/m³ de béton)



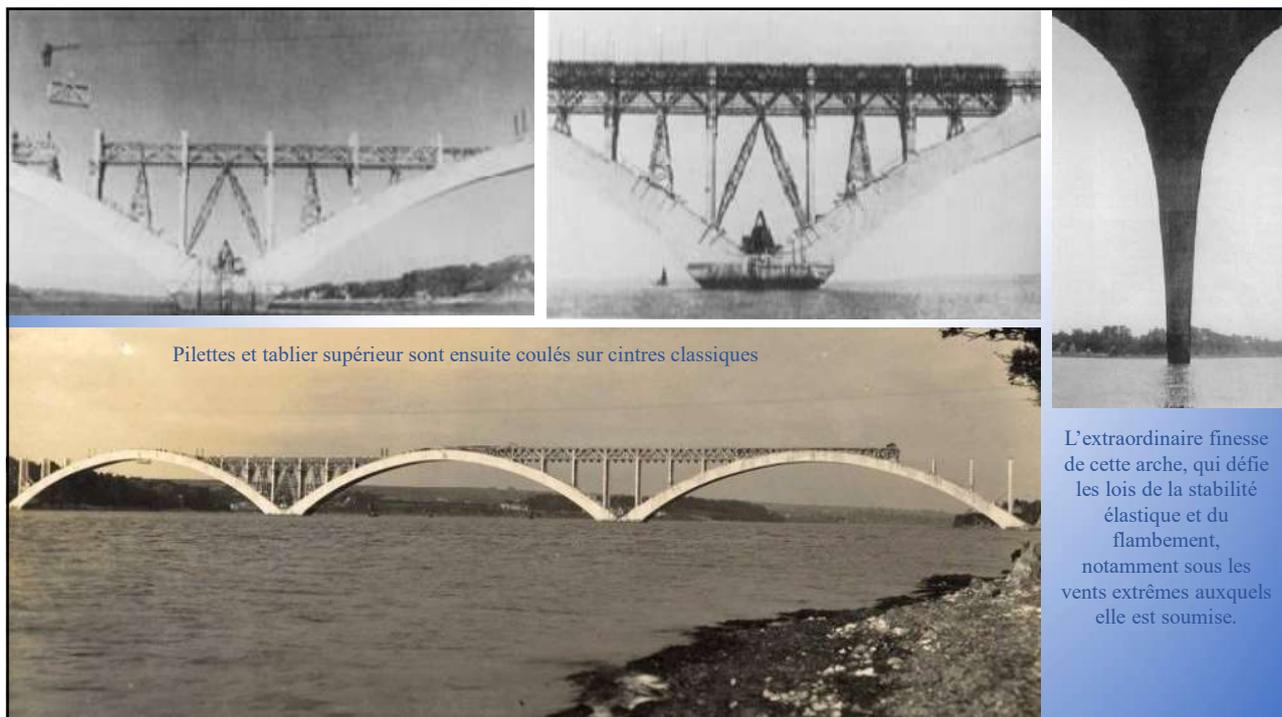


Le premier arc est terminé le 7 août 1928, le cintre est aussitôt amené en position du deuxième arc, au centre de la passe, puis le 19 janvier 1929 en position du troisième, en rive droite, côté Brest.



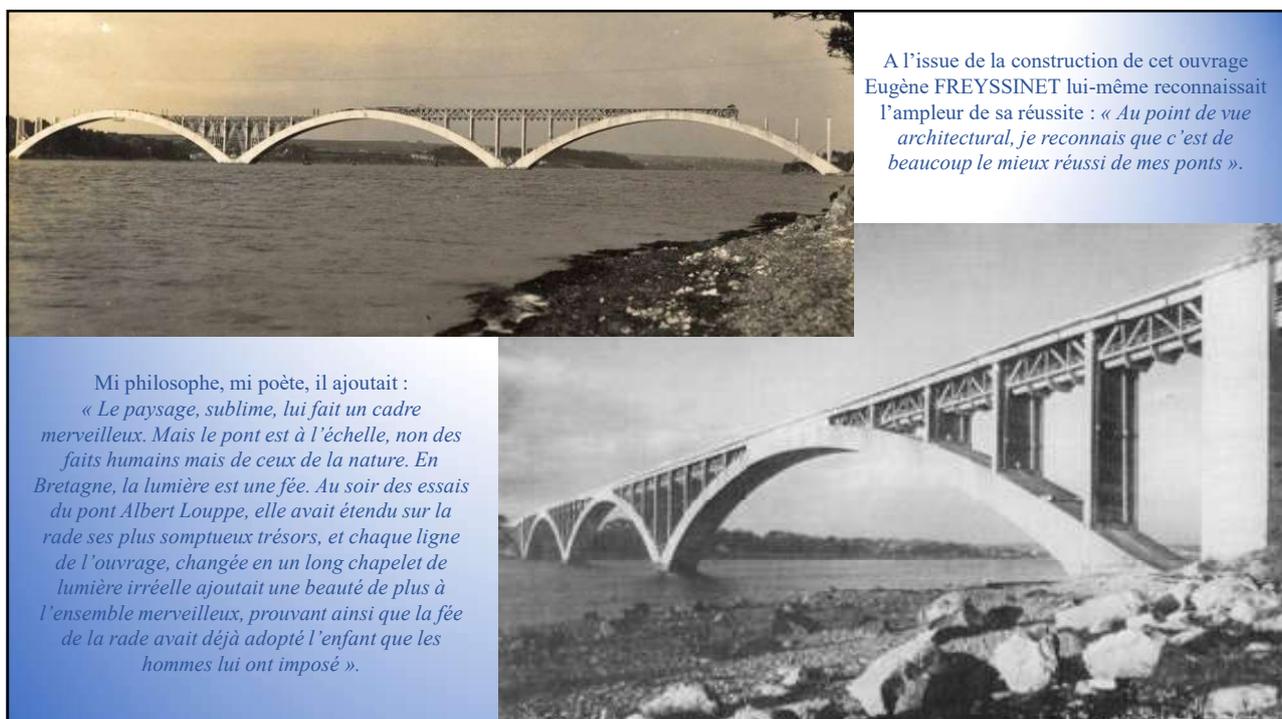
Le décentrement de chaque arc est réalisé, comme Eugène FREYSSINET en avait maintenant la parfaite maîtrise, par la mise en pression des 24 vérins de 250 tonnes disposés à la clé de ces arcs.





Pilettes et tablier supérieur sont ensuite coulés sur cintres classiques

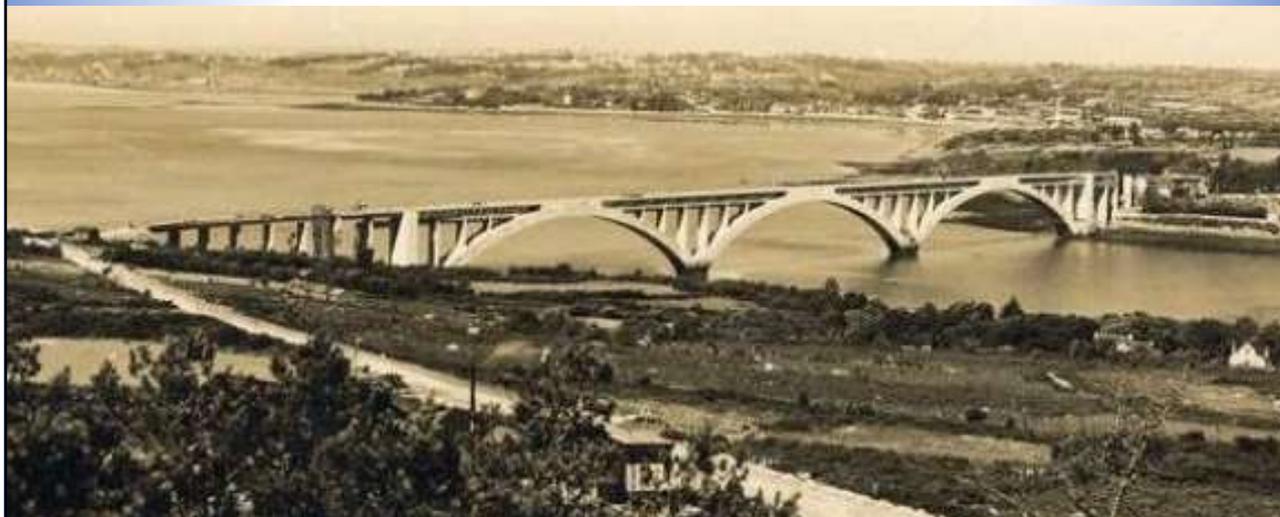
L'extraordinaire finesse de cette arche, qui défie les lois de la stabilité élastique et du flambement, notamment sous les vents extrêmes auxquels elle est soumise.



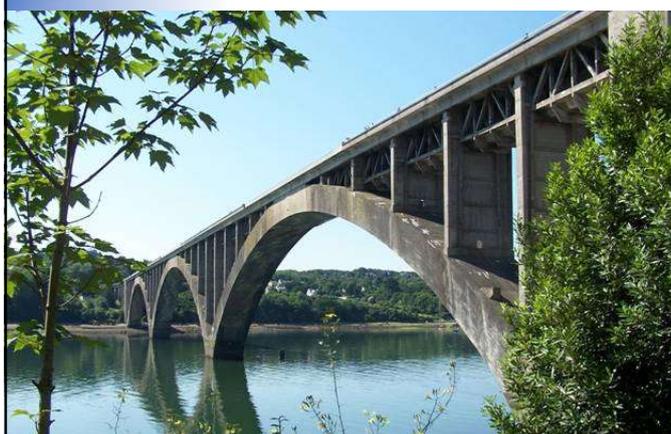
A l'issue de la construction de cet ouvrage Eugène FREYSSINET lui-même reconnaissait l'ampleur de sa réussite : « *Au point de vue architectural, je reconnais que c'est de beaucoup le mieux réussi de mes ponts* ».

Mi philosophe, mi poète, il ajoutait :
 « *Le paysage, sublime, lui fait un cadre merveilleux. Mais le pont est à l'échelle, non des faits humains mais de ceux de la nature. En Bretagne, la lumière est une fée. Au soir des essais du pont Albert Loupe, elle avait étendu sur la rade ses plus somptueux trésors, et chaque ligne de l'ouvrage, changée en un long chapelet de lumière irréelle ajoutait une beauté de plus à l'ensemble merveilleux, prouvant ainsi que la fée de la rade avait déjà adopté l'enfant que les hommes lui ont imposé* ».

Par-delà tous les superlatifs que l'on peut employer sur le Pont de Plougastel, sur sa beauté, sa hardiesse, son ingéniosité, on peut dire qu'il est la consécration définitive de l'emploi du béton armé par Eugène FREYSSINET et le point final de son utilisation pour la construction des grands ouvrages, puisque, dès la fin du chantier, et avant même l'inauguration du Pont Albert Louppe, le 9 octobre 1930, par le Président de la République, Monsieur Gaston Doumergue, c'est vers un autre matériau, qu'Eugène FREYSSINET allait désormais se tourner et auquel il allait consacrer toute sa carrière et tout le restant de sa vie..... : le **béton précontraint**



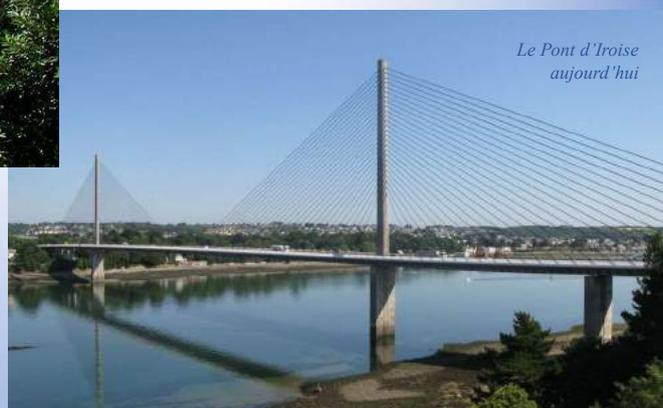
Une dernière vue du Pont Albert Louppe aujourd'hui



Maquettes en 1988 ...



*Le Pont d'Iroise
aujourd'hui*



Depuis 1994, un second pont franchit l'Elorn,
le Pont d'Iroise,
qui est venu compléter mais pas remplacer
le Pont Albert Louppe

Nous sommes en 1929, Eugène FREYSSINET a 50 ans,
mais il y pense en fait depuis près de 25 ans,
et le 2 octobre 1928, le premier Brevet sur la **Précontrainte** est déposé.

mais Claude Limousin ne croit
pas en l'avenir de la
précontrainte ...

Alors, bien qu'il soit maintenant connu, même devenu célèbre, avec plusieurs
records du monde à son actif, que son avenir soit assuré,

Eugène FREYSSINET quitte l'Entreprise,
et continue tout seul son Aventure.....

Il abandonne tout, l'argent, les honneurs, la gloire, pour sa passion :
la **Précontrainte**

REPUBLIQUE FRANÇAISE.
MINISTÈRE DU COMMERCE ET DE L'INDUSTRIE.
DIRECTION DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE.
BREVET D'INVENTION.
Gr. 7. — Cl. 4. N° 680.547

Procédé de fabrication de pièces en béton armé.

MM. Eugène FREYSSINET et Jean SEAILLES résidant en France (Seine).

Demandé le 2 octobre 1928, à 16^h 20^m, à Paris.

Délivré le 23 janvier 1930. — Publié le 1^{er} mai 1930.

(Brevet d'invention dont la délivrance a été ajournée en exécution de l'art. 1157 de la loi du 6 juillet 1884 modifiée par la loi du 9 avril 1901.)

La présente invention a pour objet une méthode de fabrication de pièces ou éléments en béton armé moulés d'avance et destinés à n'être employés ou mis en place qu'après leur prise et leur durcissement, tels que poteaux, poutres, fermes, traverses de chemin de fer, caissons, cloisons, poutrelles, etc...

Dans les procédés habituels en usage le béton pour servir les armatures que l'on place dans le moule sans qu'elles aient à subir une tension initiale pendant la fabrication. Dans la pièce terminée, le métal travaillé, par suite, subit les efforts auxquels elle est soumise, soit à la traction, soit à la compression; or, on considère généralement comme nulle la résistance du béton à l'extension et son travail à la compression est seul utilisé.

Le procédé de cette invention consiste au contraire à armer les pièces de telle sorte que l'ensemble se comporte comme si le béton absorbait une partie importante des efforts de flexion, ce qui, à résistance égale, permet de n'employer qu'une quantité de métal très réduite et d'obtenir, par suite, des pièces plus légères et d'un prix de revient beaucoup moins élevé, le fer constituant l'armature représentée, à raison de son prix, la matière perméable la plus onéreuse.

Dans ce but, les armatures sont tendues au moyen de tout dispositif convenable dans le moule de façon, non seulement à les raidir, mais encore à les y soumettre à un effort de traction plus ou moins important, mais qui pourra être posé plus loin, en vue de leur donner une tension initiale qui sera généralement d'un ordre tel, qu'elle correspondra à un allongement élastique important du métal.

Les armatures ainsi tendues, sont de préférence pourvues de dispositifs d'ancrage destinés à transmettre au béton après prise, les efforts de tension initiale auxquelles sont soumises, de telle sorte qu'après démoulage, les dispositifs de tension étant relâchés, le métal reste tendu dans le béton qui sera, par là même, mis en état de compression permanente. L'ensemble de la pièce armée obtenue sera donc composé d'un bloc dans lequel, avant tout effort de charge ou de surcharge, tout ou partie du métal travaillé déjà à la traction et le béton à la compression.

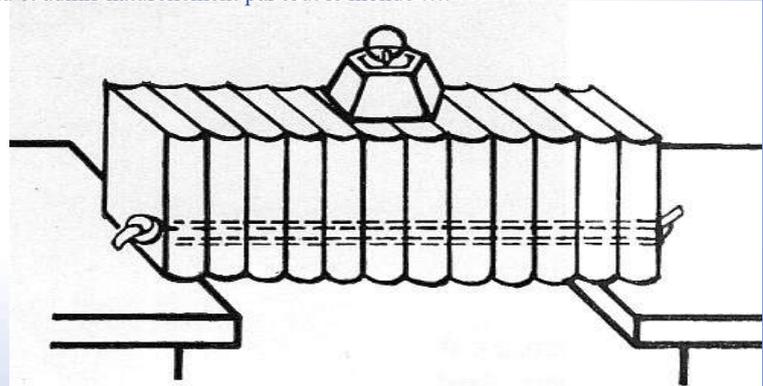
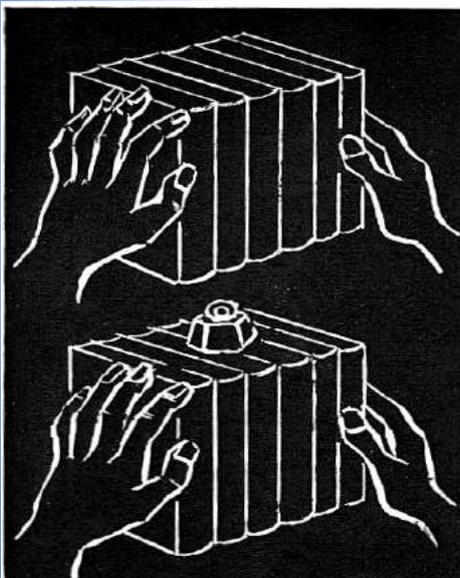
La description qui va suivre, en regard du dessin annexé, donné à titre d'exemple, fera bien comprendre de quelle manière l'invention peut être réalisée.

La fig. 1 est le schéma d'une installation de moulage d'un bloc parallélépipédique, 60

Prix du fascicule : 5 francs.

Avant de vivre demain, cette Aventure, et de mieux la comprendre, quelques mots pour définir ce qu'est la Précontrainte

Son principe : connu et admis naturellement par tout le monde ...



... et de nombreuses autres applications de ce principe existaient déjà :

- liaison mécanique de deux pièces par vissage,
- cerclage des tonneaux en bois pour les viticulteurs,
- cerclage métallique des roues en bois
- rayons des roues de vélo,

L'idée d'appliquer ce principe au béton n'était pas nouvelle, d'autres tentatives avaient précédé Eugène Freyssinet, mais toutes s'étaient jusqu'ici heurtées à des impossibilités qui les avaient conduites à des échecs.

Un manuscrit inédit de la main même d'Eugène Freyssinet dévoile la réponse :

« Un jour, il me vient à l'esprit que, si l'on ne pouvait contraindre le béton à suivre sans rupture la déformation de l'acier, on pouvait par contre imposer à l'acier la déformation du béton. Pour cela, il suffisait de soumettre l'ensemble des armatures à une tension totale plus élevée que toute traction ultérieure, de manière à ce que le béton se trouve comprimé en permanence ».

Pour y parvenir, Eugène Freyssinet a dû d'abord :

- d'une part découvrir le fluage du béton
- trouver le moyen d'augmenter la résistance à la compression du béton
- mettre au point des aciers pouvant supporter des tensions plus élevées et une relaxation plus faible

Mais comment faire accepter,

seul, sans soutien (ni de l'Administration, ni d'une Entreprise)

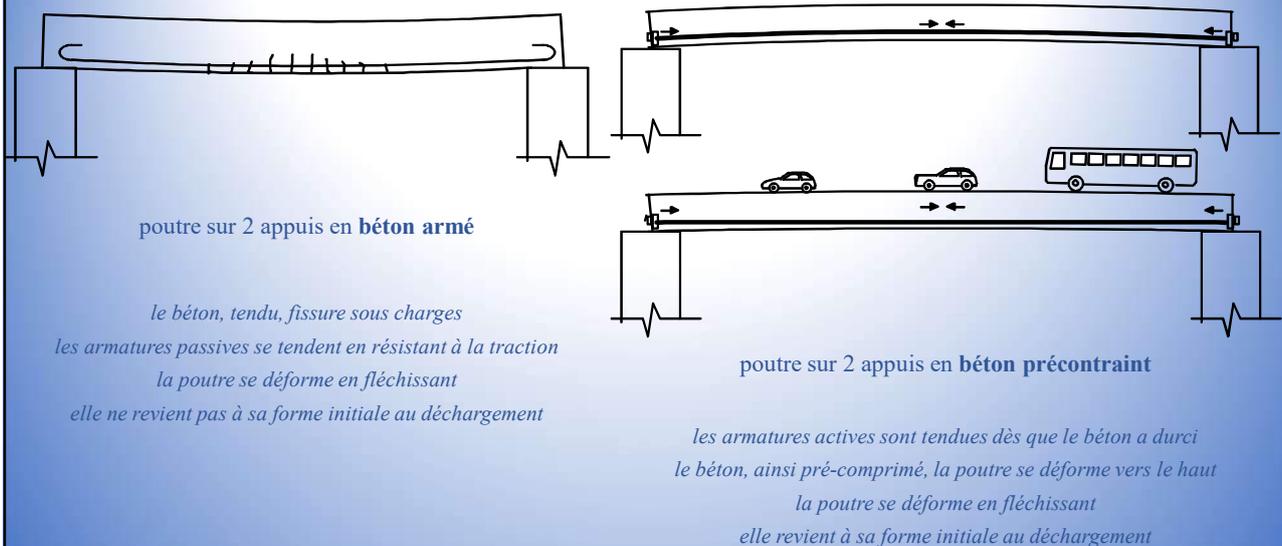
dans un contexte extrêmement compétitif,

un procédé aussi original

contraire à toute réglementation ?

Le combat ne pouvait être que difficile....

Fonctionnement très différent d'une poutre en béton armé et d'une poutre en béton précontraint



Avant de tourner cette page des 25 premières années et de passer à la seconde étape, certes fondamentale, que sera celle de la Précontrainte, un rappel (non exhaustif), mais néanmoins un extraordinaire bilan, de tout ce qu'a fait Eugène FREYSSINET pour le béton armé, en plus de ses recherches sur la composition même et la fabrication du béton :

- . Il a découvert le **Fluage du béton**
- . Il a imaginé puis développé la technique du **Décintrement des Arcs par vérinage à la clé** (avec la maîtrise des moments)
- . Il a inventé la **Vibration du béton** pour améliorer sa compacité et accroître sa résistance (*plus que doubler, de 200 à 500 bars*)
- . Il a développé la **Préfabrication de pièces en béton**, incorporées dans la structure
- . Il a inventé la **Construction par encorbellement symétrique**, soutenue par des câbles
- . Il a développé les **Coffrages réutilisables** et développé leurs techniques de déplacement
- . Il a inventé le premier **Transporteur à câble** de cette taille (nommé « blondin ») pour desservir les chantiers longs
- . Il a développé la **Maîtrise des coques** en béton en voile mince faiblement armées
- . Il a inventé les **Articulations à noyau de béton fretté** (dites « articulations Freyssinet
- . Il a imaginé la **Mise en tension des tirants des voûtes** de couverture pour compenser les effets du retrait (et du fluage)
- . Il a battu par trois fois en l'améliorant le **Record du Monde** de portée d'ouvrages en béton armé

Si vous le voulez bien, demain, nous poursuivrons cette fantastique Epopée d'Eugène Freyssinet, avec notamment :

. l'**Aventure des Poteaux de La Forclum ...**

. le fabuleux **Sauvetage de la Gare Maritime du Havre**

. sa **Rencontre avec Edme CAMPENON** et son arrivée chez Campenon Bernard

. l'**Aventure Algérienne**

. la poursuite de ses recherches et de son développement avec la **création de la STUP**

. quelques uns de ses ouvrages les plus emblématiques et des projets précurseurs....

. ses fidèles disciples et la véritable « Ecole » qu'il a créée pour perpétuer son œuvre

. et nous terminerons en essayant de mieux comprendre son **Héritage**

Merci de votre attention

A suivre...